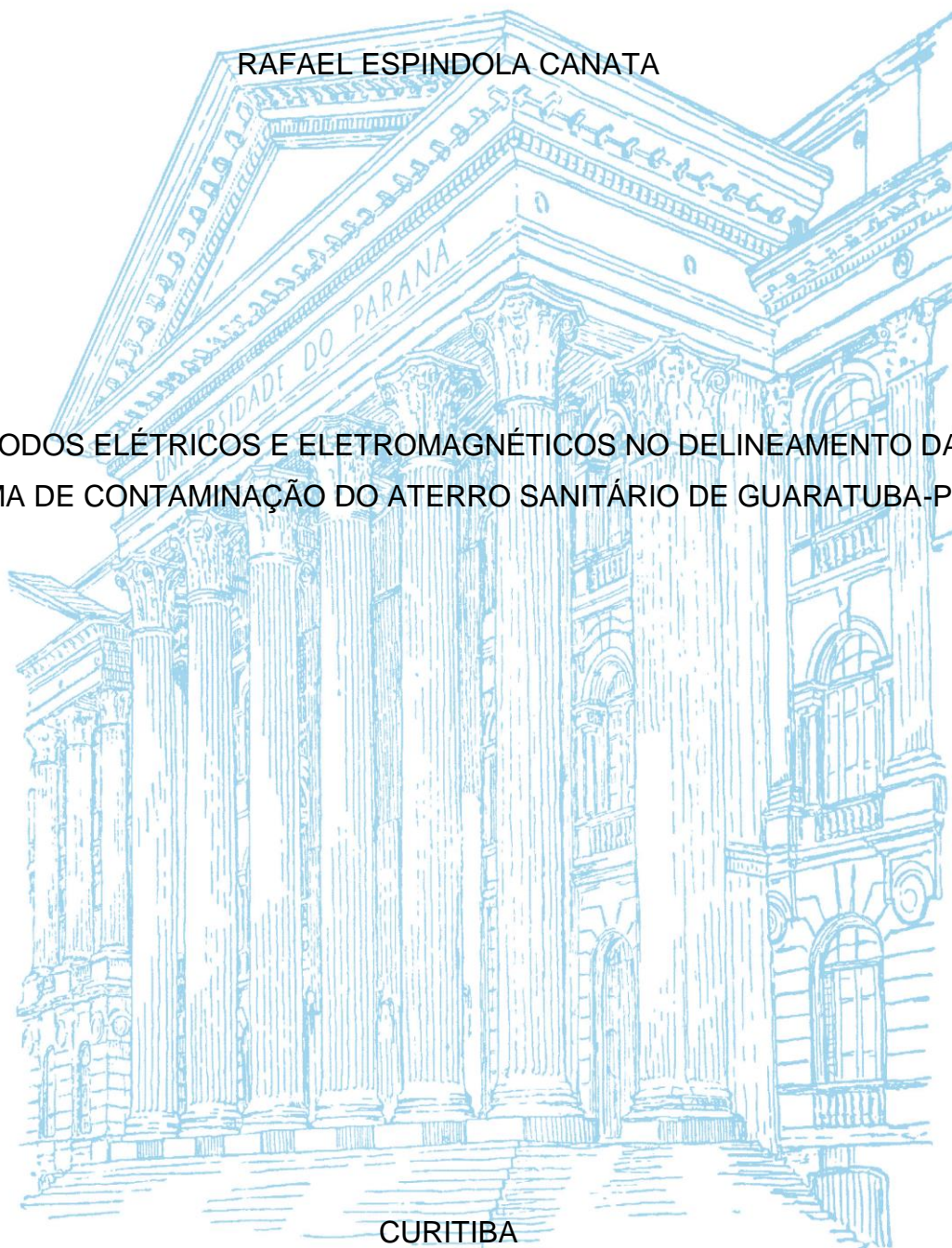


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL ESPINDOLA CANATA

MÉTODOS ELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS NO DELINEAMENTO DA
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE GUARATUBA-PR

CURITIBA
2015



Rafael Espindola Canata

MÉTODOS ELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS NO DELINEAMENTO DA
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE GUARATUBA-PR

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de Título de mestre em Geologia, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA

Co-orientador:

Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador

CURITIBA
2015

C213m

Canata, Rafael Espindola

Métodos elétricos e eletromagnéticos no delineamento da pluma de contaminação do aterro sanitário de Guaratuba-PR/ Rafael Espindola Canata. – Curitiba, 2015.

164 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2015.

Orientador: Francisco José Fonseca Ferreira – Co-orientador: Fábio Augusto da Silva Salvador.

Bibliografia: p. 127-132.

1. Aterro sanitário - Guaratuba (PR). 2. Geofísica - Medição. 3. Lixo - Contaminação. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ferreira, Francisco José Fonseca. III. Salvador, Fábio Augusto da Silva . IV. Título.

CDD: 550.286

TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL ESPINDOLA CANATA

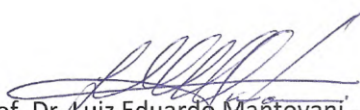
*“Métodos elétricos e eletromagnéticos no
delineamento da pluma de contaminação do
aterro sanitário de Guaratuba - PR”*

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em
Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental, da Universidade
Federal do Paraná. Comissão formada por:

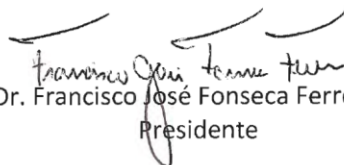
Curitiba, 24 de abril de 2015.



Prof. Dr. Weliton Rodrigues Borges - UnB



Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani - UFPR



Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira - UFPR
Presidente

Dedico este trabalho aos meus pais,
Cesar e Mary, e a minha esposa,
Fabiana Bettú, que sempre me
apoiam.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos espíritos de luz que me conduziram em horas difíceis e de incertezas.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

Ao orientador professor, Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR), por acreditar na pesquisa desde a primeira conversa, pelas cobranças, ensinamentos, incentivos e principalmente pelas críticas, valeu Chico!

Ao co-orientador perito federal, Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador, pela oportunidade de realizar meu sonho e pelo incentivo de buscar novos horizontes, valeu Salvador!

Ao amigo geólogo e geofísico, Ms. Rodoilton Stevanato, pelo vasto conhecimento fornecido em campo, no laboratório e pela experiência profissional adquirida ao longo desta pesquisa, valeu meu camarada!

Aos colegas Joelson, André Spsila (Matinho), pela ajuda nas aquisições geofísicas, valeu meus amigos!

Ao colega Oderson de Souza Filho, CPRM-PR, pela ajuda no levantamento do método eletromagnético indutivo.

Ao geólogo Góis, por disponibilizar o relatório de pesquisa mineral da área estudada. A Cristina Bicho, do DNPM, por fornecer as imagens obtidas pelo V.A.N.T.

Ao Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges, pela recepção na Universidade de Brasília, pelas contribuições fornecidas no exame de qualificação, pelos primeiros ensinamentos no equipamento GPR e no programa reflexW, muito obrigado!

A minha família.

Aos meus pais, Sr. Cesar e Sra. Mary, por terem abdicado alguns momentos das suas vidas para fornecer a maior riqueza existente neste mundo, o estudo. Amo vocês!

E um especial a minha esposa e geóloga Fabiana Bettú por fazer parte da minha vida, por aturar minhas preocupações, irritações e ter segurado muitas pressões profissionais e pessoais, além de ser a maior incentivadora desta pesquisa, te amo!

*“Além, muito além onde quero chegar
Caindo a noite me lanço no mundo
Além do limite do vale profundo
Que sempre começa na beira do mar
É na beira do mar...”*

Beira-Mar
Zé Ramalho

Resumo

O antigo lixão de Guaratuba, litoral do Estado do Paraná, foi implantado em 1989 e o descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos perdurou por dez anos. A maior quantidade dos resíduos foi disposta na porção setentrional, correspondente ao depósito atual. O objetivo principal da pesquisa é delinear a pluma de contaminação em subsuperfície e averiguar sua eventual migração, através dos métodos geofísicos elétricos (eletrorresistividade e polarização induzida) e eletromagnéticos (*Ground Penetrating Radar* e eletromagnético indutivo). A área de estudo contempla granitos do Proterozóico Inferior e sedimentos recentes do Quaternário. Foram realizados cinco perfis de eletrorresistividade e polarização induzida com arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=20\text{m}$) com seis níveis de investigação, totalizando um levantamento de 1800 m, dispostos no interior e fora do depósito, além de uma sondagem elétrica vertical ($AB/2=150\text{m}$) sobre o depósito de resíduo atual. O levantamento GPR foi realizado em áreas externas e interna ao depósito futuro resultando em seis perfis, com extensão total de 745 m, entretanto, apenas três possibilitaram mapear as estruturas rasas e os resíduos sólidos no aterro sanitário e os granitos. O levantamento eletromagnético foi executado no modo dipolo vertical, com bobinas espaçadas de 20 m e 40 m, intervalo de amostragem de 10 m, ao longo de seis perfis distribuídos em porções internas e externas ao aterro sanitário, totalizando 1520 m. O resultado da sondagem elétrica vertical indicou uma baixa resistividade ($16,6 \Omega\cdot\text{m}$) associada ao percolado e ao resíduo sólido do depósito atual, evidenciando uma espessura de aproximadamente 30m. Os resultados dos modelos de profundidade obtidos por inversão 2D dos dados elétricos caracterizaram a pluma de contaminação através de baixas resistividades ($< 50 \Omega\cdot\text{m}$), no depósito atual, em contraste às altas resistividades ($> 125 \Omega\cdot\text{m}$) no depósito futuro, interpretadas como resposta do embasamento. Os dados eletromagnéticos indicaram valores elevados de condutividades aparentes ($> 20 \text{ mS/m}$) relacionados ao percolado no depósito atual, enquanto no depósito futuro o substrato foi identificado por baixos valores de condutividade aparente ($< 16 \text{ mS/m}$). Os resultados obtidos mostraram que a aplicação conjunta dos métodos elétrico e eletromagnético possibilitaram o delineamento da pluma de contaminação em subsuperfície, além do estabelecimento de padrões geofísicos distintos entre os tratos possivelmente contaminados e os não poluídos.

Palavras-chave: Aterro Guaratuba. Métodos geofísicos. Contaminação

Abstract

The former landfill from the city of Guaratuba, located in the Paraná State coast, was established in 1989 and the improper disposal of municipal solid waste lasted for ten years. The largest amount of waste was disposed in the northern zone, which corresponds to the area currently in use by the landfill. The main objective of the research is to outline the subsurface contamination plume and investigate the possible migration pathway through electrical geophysical methods (resistivity and induced polarization) and electromagnetic (ground penetrating radar and inductive electromagnetic). The background geology of the area includes Lower Proterozoic granites and Quaternary sediments. Five resistivity and induced polarization profiles totaling 1800 m of logging with dipole-dipole arrange were performed inside and outside the deposit, with six levels of investigation. A vertical electrical survey ($AB/2=150$ m) was executed over the current deposit. The GPR survey comprised internal and external areas of the future deposit resulting in six profiles, totaling 745 m. However only three allowed to map the shallow structures in the landfill and granites and the solid waste. The electromagnetic survey was executed using a vertical dipole arrange, with the coils separated 20 m and 40 m, with a sampling interval of 10 m, along the six profiles distributed outside and inside of the landfill totaling 1520 m. The vertical electrical survey results indicates low resistivity (16,6 $\Omega.m$), related to the leachate and solid waste from the recent deposit with an estimate thickness of 30 m. However the results of deep-models obtained by 2D inversion of electrical data characterized the contamination plume through low resistivity (<50 $\Omega.m$), in the active deposit contrasting the high resistivities (> 125 $\Omega.m$) of the future deposit, interpreted as a basement response. The electromagnetic data showed high values of apparent conductivity (> 20 mS/m) related to the current leachate storage while in the future landfill the substrate deposit was identified by low values of apparent conductivity (<16 mS/m). The results showed that the combination of electrical and electromagnetic methods have enabled the outline of the subsurface contamination plume and established different geophysical patterns between the possibly contaminated and uncontaminated tracts.

Key-words: Guaratuba landfill. Geophysical methods. Leachate.

Lista de Figuras

FIGURA 1: As fotos evidenciam: A) Antigo lixão; B) Ilustra a emenda entre o lote 1 e 2 ; C) Obra de readequação;D) Visão panorâmica geral do aterro sanitário em fase de construção. (FOTOS cedidas pelo gerente Elcio da Veiga).	18
FIGURA 2: Imagem da área do ano 2009 (direita) e do ano 2012 (esquerda), ilustrando o avanço do aterro para Sul (FONTE: GOOGLE EARTH, 2009, 2012)....	19
FIGURA 3: As fotos evidenciam: A) Lavra de granito; B) Canaletas com chorume estagando; C) Disposição irregular de lixo; D) Migração de substância organoferrosa oriunda do antigo lixão. Fonte: Policia Federal-PR (2013).	20
FIGURA 4: Mapa dos municípios do Paraná com a disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (IAP, 2012).	25
FIGURA 5: Processos que produzem atenuação na contaminação (FOSTER et al. 1987, apud ELIS, 1999).	31
FIGURA 6: Ilustração do esquema de um condutor com a indicação dos parâmetros usados no cálculo da resistividade (KEARY et al., 2009).	36
FIGURA 7: Valores de resistividade e condutividade de alguns minerais e rochas (modificado TELFORD et al., 1990)	38
FIGURA 8: Representação idealizada do fluxo de corrente em um ponto C e sua distribuição no semiespaço (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).	39
FIGURA 9: Curva de decaimento IP (Fonte: manual de operação do ELREC PRO).	43
FIGURA 10: Representação do modelo idealizada para o fenômeno da polarização metálica resultante da barreira originada pelos íons na superfície do grão metálico. Situação original (A) e após a aplicação de corrente elétrica (B) (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).	44
FIGURA 11: Representação do modelo idealizada para o fenômeno da polarização de membrana originada por mineral de argila e minerais fibrosos(modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).	45
FIGURA 12: Representação gráfica das linhas de correntes e equipotenciais na técnica de aquisição da sondagem elétrica vertical (SEV) (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).	46

FIGURA 13: Representação do arranjo dipolo-dipolo (ELIS,1999).	48
FIGURA 14: Pseudoseção de resistividade aparente (a), sintética (b) e o modelo de profundidade obtido por inversão (c) (STEVANATO et al., 2014).	49
FIGURA 15: Representação do modelo esquemático do método eletromagnético indutivo, (modificado de DENTITH & MUNDGE ,2014).....	52
FIGURA 16: Configurações comuns das bobinasdipolares (BORGES, 2007).	53
FIGURA 17: Distribuição de cargas por corrente de condução (a) e distribuição de cargas por corrente de deslocamento (b) (ANNAN, 1992).	57
FIGURA 18: Variação da velocidade e da atenuação pela frequência, evidenciando a frequência de transição entre a dispersão e a propagação da onda (JOL, 2009).	59
FIGURA 19: Ilustração da técnica de transiluminação (modificado de JOL, 2009). T = antena transmissora, R = antena receptora.	62
FIGURA 20: Ilustração da técnica common midpoint (modificado de ANNAN, 2001). T = antena transmissora, R = antena receptora. S1, S2, S3 = separação entre T e R.	62
FIGURA 21: Representação da técnica common offset (modificado de ANNAN, 2002).	63
FIGURA 22: Mapa com as principais vias de acesso a área estudo.....	64
FIGURA 23: Distribuição dos climas Cfa e Cfb no Estado do Paraná conforme a classificação de Koppen (IAPAR,1998).....	65
FIGURA 24: Mapa geomorfológico da área de estudo (MINEROPAR, 2006).....	66
FIGURA 25: Mapa geológico simplificado da área de estudo (modificado GÓIS, 1999).	68
FIGURA 26: Imagem do aterro sanitário sobreposta ao MDE (DNPM, 2013).....	71
FIGURA 27: Modelo digital de elevação (MDE) da área pesquisada.....	71
FIGURA 28: Mapa de escoamento superficial.	72
FIGURA 29: Ilustração dos pontos de coletas das amostras de chorume (modificado Preussler, 2008).	73
FIGURA 30: A) Foto do equipamento uVANT; B) Foto evidenciando o levantamento no aterro sanitário de Guaratuba.....	76
FIGURA 31: Imagem aérea do aterro sanitário de Guaratuba-PR captada pelo VANT (DNPM, 2013).	76

FIGURA 32: Fotos dos equipamentos de eletrorresistividade/IP. A) Sistema Transmissor VIP3000 e B) Sistema receptor multicanal;(C) Bobina e eletrodo de corrente e (D) Eletrodo de potencial.....	77
FIGURA 33: Mapa com a localização das linhas de caminhamento elétrico.	78
FIGURA 34: Foto possibilita uma visão panorâmica da Linha L1 de ER/IP.	79
FIGURA 35: Foto evidencia a aquisição de dados de ER/IP ao longo da Linha L2. .	79
FIGURA 36: Fotos de localização da Linha L3 (esquerda) e da manta impermeabilização sotoposta ao antigo lixão (direita). Fotos cedidas pelo Departamento de Polícia Federal-PR.....	80
FIGURA 37: Mapa com a localização da SEV.	81
FIGURA 38: As fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR sobre o depósito futuro (A) e adjacente ao depósito atual (B).....	82
Figura 39: Mapa com a localização dos perfis de GPR.....	83
FIGURA 40: Foto registra a bobina receptora e o modulo de recepção do equipamento EM34-3 usados no aterro sanitário de Guaratuba.....	84
FIGURA 41: Mapa com a localização dos perfis eletromagnéticos realizados com o EM34-3.....	85
FIGURA 42: A) Curva de resistividade aparente com o modelo ajustado e B) Modelo geoeletrico elaborado pela SEV1.	87
FIGURA 43: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior).....	89
FIGURA 44: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 1.	90
FIGURA 45: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 2.	92
FIGURA 46: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da linha 2.....	93
FIGURA 47: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 3.	95
FIGURA 48: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 3.	96
FIGURA 49: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 4.	98

FIGURA 50: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 4.	99
FIGURA 51: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 5.	101
FIGURA 52: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 5.	102
FIGURA 53: Mapa de isoresistividade nível 2 de profundidade de 6,5m.	104
FIGURA 54: Mapa de isoresistividade nível 3 de profundidade de 15m.	104
FIGURA 55: Mapa de isoresistividade nível 4 de profundidade de 25m.	105
FIGURA 56: mapa de isoresistividade nível 5 de profundidade de 34m.	105
FIGURA 57: Resultados do perfil EM34-3A (vide localização na Figura 42).....	106
FIGURA 58: Resultados dos perfis EM34-3B, EM34-3C e EM34-3D (vide localização na Figura 42).	107
FIGURA 59: Resultados do perfil EM34-3E (vide localização na Figura 42).....	108
FIGURA 60: Resultados do perfil EM34-3E (vide localização na Figura 42).....	108
FIGURA 61: Mapa com a correlação espacial entre os perfis elétricos e eletromagnéticos (EM34-3).	109
FIGURA 62: Perfil de correlação 1 (TABELA 8) indicando os dados de condutividade aparente (painel superior) e os de resistividade (painel inferior).	110
FIGURA 63: Perfil de correlação 2 (TABELA 8) indicando os dados de condutividade aparente (painel superior) e os de resistividade (painel inferior).	111
FIGURA 64: Perfil de correlação 3 (TABELA 8) indicando os dados de condutividade aparente (painel superior) e os de resistividade (painel inferior).	112
FIGURA 65: Perfil de correlação 4 indicando os dados de condutividade aparente do perfil EM34-3F (painel superior) e o correspondente modelo de resistividade da Linha 3 (painel inferior).	113
FIGURA 66: Mapa sugestivo das áreas possivelmente contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas.	114
FIGURA 67: Ilustra os fragmentos rochosos que compõem a estrutura dos drenos e a presença da geomembrana. e a presença da geomembrana.	116
FIGURA 68: Refletores interpretados como material areno-siltico-argiloso.	116
FIGURA 69: Refletor interpretado como a geomembrana.	117

FIGURA 70: Atenuação de refletores provavelmente em decorrência do percolado.	117
FIGURA 71: Perfis radargramas aquisição depósito futuro. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.	118
FIGURA 72: Fotos de uma bancada no depósito atual (direita) e dreno captação de chorume, água pluvial e fragmentos rochosos.	119
FIGURA 73: Imagem ilustra o refletores associados a camada de recobrimento e ao dreno.	119
FIGURA 74: Refletores ilustrando o possível resíduo sólido.	120
FIGURA 75: Perfis radargramas aquisição depósito atual. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.	121
FIGURA 76: Perfis radargramas aquisição depósito futuro. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.	122
FIGURA 77: Contato do granito com o material solo areno-siltico-argiloso.	123
FIGURA 78: Perfil radargrama aquisição área adjacente ao aterro atual. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.	124
FIGURA 79: Mapa de localização das sondagens (GÓIS, 1997).	134
FIGURA 80: Mapa de isocargabilidade nível 2 com profundidade de 6,5m	163
FIGURA 81: Mapa de isocargabilidade nível 3 com profundidade de 15m	163
FIGURA 82: Mapa de isocargabilidade nível 4 com profundidade de 25m	164
FIGURA 83: Mapa de isocargabilidade nível 4 com profundidade de 34m	164

Lista de Tabela

TABELA 1: Variações da composição química em relação às idades dos resíduos.	27
TABELA 2: Fatores geométricos dos principais arranjos	41
TABELA 3: Profundidade efetiva de investigação para o arranjo dipolo – dipolo.....	47
TABELA 4: Relação entre espaçamentos entre as bobinas, frequência, de operação, profundidades DMH e DMV, para sistemas eletromagnéticos indutivos.	53
TABELA 5: Permissividade dielétrica e condutividade elétrica de alguns materiais (secos e saturados).....	59
TABELA 6: Parâmetros da amostra de chorume do ponto 1 (FIGURA 29).....	74
TABELA 7: Resultados das análises dos poços de monitoramento 2 e 3.....	86
TABELA 8: Perfis EM34-3 correlacionados com o modelo real de resistividade. ...	110
TABELA 9: Parâmetros característicos de áreas contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas.	114

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Histórico do Aterro Sanitário	17
1.2. Objetivos da pesquisa	19
1.3. Integração entre Academia e Criminalística	21
2. Classificação de Resíduos Sólidos.....	22
2.1. Origem.....	22
2.2. Periculosidade.....	23
2.3. Disposição dos Resíduos.....	23
2.4. Disposição no Paraná.....	24
2.4.1. Formação e composição do chorume	26
2.4.2. Composição físico-química do chorume	26
3. Fundamentação Teórica.....	32
3.1. Métodos Elétricos	32
3.2. Eletorresistividade e polarização induzida.....	32
3.2.1. Eletorresistividade	35
3.2.2. Polarização Induzida (IP)	42
3.2.3. Técnicas de aquisição	45
3.2.4. Pseudoseção.....	49
3.2.5. Método de inversão da pseudoseção	50
3.3. Métodos Eletromagnéticos	51
3.3.1. Eletromagnético Indutivo (EM)	51
3.3.2. Ground Penetrating Radar- GPR	54
3.3.3. Técnicas de aquisição	61
4. Área de Estudo	64
4.1. Localização e acesso à área de estudo.....	64
4.2. Clima	64

4.3. Geomorfologia e Geologia	65
4.3.1. Geomorfologia	66
4.3.2. Geologia	67
4.4. Modelo digital de elevação (MDE)	70
4.5. Característica do chorume no aterro sanitário de Guaratuba	73
5. Equipamentos e software	75
5.1. Sistema Veicular Aéreo não Tripulado	75
5.2. Eletrorresistividade/IP	77
5.3. Ground Penetrating Radar (GPR)	81
5.4. EM34-3.....	83
6. Resultados e discussões	86
6.1. Análise de poços de monitoramento.....	86
6.2. Métodos Elétricos	87
6.2.1. Sondagem elétrica vertical (SEV)	87
6.2.2. Caminhamento elétrico (CE- arranjo dipolo-dipolo)	88
6.3. Métodos eletromagnéticos.....	106
6.3.1. EM343-3	106
6.3.2. Integração-ER e EM34-3.....	109
6.3.3. GPR.....	114
7. Conclusões	125
8. Referências bibliográficas	127
ANEXOS.....	133
ANEXO 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS	134
ANEXO 2: DESCRIÇÃO DE SONDAGENS.....	135
ANEXO 3: MAPAS DE ISOCARGABILIDADES.....	163

1. Introdução

O Brasil é o quinto maior produtor de lixo do mundo, atrás apenas da União Europeia, da China, dos Estados Unidos e do Japão, sendo que no ano de 2013 foram produzidas aproximadamente 76 milhões toneladas de resíduos sólidos urbanos (ALBREPE, 2014). É importante mencionar que tal montante corresponde apenas ao lixo residencial, portanto sem considerar os originados pelas indústrias, construção civil, comércio, hospitalar, etc.

O aumento da geração de lixo nos últimos anos se deve a alguns fatores como o crescimento populacional, o aumento do poder aquisitivo da sociedade e o consumo, entre outros. Uma estimativa exemplificada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) diz respeito a disposição inadequada desses resíduos, onde dos 5.564 municípios brasileiros, 3.282 ainda descartam seus resíduos em lixões ou em aterros controlados, ou seja 59% dos municípios (MMA, 2014). A falta de planejamento de gestão ambiental, a dificuldade de técnicos especializados nas prefeituras e principalmente o reduzido orçamento dos municípios brasileiros tem colaborado para esta situação.

Mesmo após a promulgação da Lei nº 12305/10 Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que encerra princípios, metas, instrumentos, diretrizes e ações que devem ser tomadas pela União isoladamente ou em parcerias com os estados, municípios e prefeituras, mais de 60% das prefeituras não cumpriram a meta estabelecida no PNRS, ou seja, a eliminação dos lixões até 2 de agosto de 2014. A mencionada Lei possui como diretriz preliminar no que se refere ao gerenciamento e gestão dos resíduos sólidos priorizar a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos, além da disposição adequada dos rejeitos.

A destinação final inadequada provoca sérios impactos sociais, à saúde e ao ambiente, pois os resíduos ao serem depositados sofrem reações físico-químicas que geram compostos químicos perigosos, orgânicos (organoclorados) e inorgânicos (metais pesados), os quais, quando lixiviados pela ação da água da chuva podem causar sérios impactos ao solo, aos rios, a água subterrânea e riscos à saúde dos seres vivos.

Uma ciência que ao longo do tempo ganhou destaque nas investigações ambientais é a geofísica, pois seus métodos constituem ferramentas indiretas que auxiliam no diagnóstico áreas contaminadas, mapeamento em subsuperfície, fluxo de água subterrânea, entre outras características da área em estudo. Algumas vantagens relacionadas a geofísica, quando comparadas aos métodos diretos, são, por exemplo, o baixo custo e a rapidez dos levantamentos.

Os métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos são aplicados à detecção e monitoramento de plumas de contaminação em aterros sanitários, uma vez que o percolado, ou chorume, encerra altas concentrações de sais dissolvidos, resultando em baixas resistividades (ELIS, 2002).

Os levantamentos geofísicos podem ser executados e interpretados em 1D, 2D ou 3D, entretanto, para reduzir as ambiguidades é aconselhável empregar vários métodos geofísicos, além das investigações diretas.

1.1. Histórico do Aterro Sanitário

O antigo lixão de Guaratuba (FIGURA 1 A) foi instalado provavelmente no ano de 1989 e por mais de dez anos recebeu resíduos sólidos urbanos sem nenhuma impermeabilização em sua base. Segundo informações do gerente do empreendimento, Sr. Elcio da Veiga, o grande descarte de resíduos sólidos urbanos ocorridos no antigo lixão estava situado na porção Norte da área, ou seja, onde hoje se encontra o depósito atual (Lote 1, FIGURA 1 B e D). Entretanto, em menor proporção, também houve disposição de uma fina camada de resíduos sólidos (em torno de 2 m) na porção Sul, correspondente ao depósito futuro (Lote 2, FIGURA 1 B e D). A FIGURA 1C ilustra a execução final da terraplanagem sobre o antigo lixão (Lote 1), e a readequação para um aterro sanitário (Lote 2).

Devido ao longo tempo de disposição inadequada dos resíduos, alguns impactos ambientais podem ter ocorrido, como a contaminação da água subterrânea e do solo (SEMA, 2006).



FIGURA 1: As fotos evidenciam: A) Antigo lixão; B) Ilustra a emenda entre o lote 1 e 2 ; C) Obra de readequação;D) Visão panorâmica geral do aterro sanitário em fase de construção. (FOTOS cedidas pelo gerente Elcio da Veiga).

O aterro sanitário de Guaratuba está localizado na Área de Proteção Ambiental (APA) homônima e abrange aproximadamente 2 hectares. A vida útil deste aterro é de aproximadamente 20 anos, entretanto, devido ao alto descarte de lixo, estima-se uma vida útil menor, segundo comunção do gerente Elcio da Veiga.

O aterro de Guaratuba recebe na baixa temporada cerca de 35 toneladas de lixo por dia, para uma população de 32.088 habitantes, e na alta temporada pode acumular aproximadamente 250 toneladas/dia de resíduos. Como observado *in loco* não há uma seleção prévia de resíduos sólidos, os quais envolvem latas, latões, utensílios domésticos, pilhas, entre outros objetos.

A FIGURA 2 (A e B) ilustra a evolução temporal da área na qual está instalado o aterro sanitário, bem como a extração do material usado para as readequações e recobrimento de resíduos descartados no aterro.

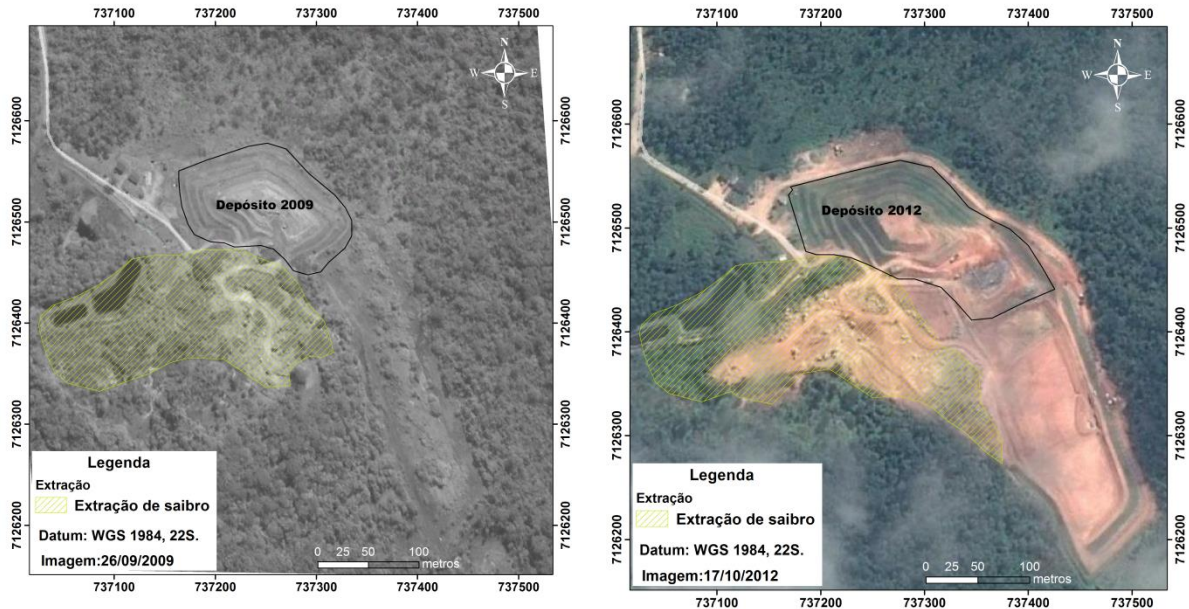


FIGURA 2: Imagem da área do ano 2009 (direita) e do ano 2012 (esquerda), ilustrando o avanço do aterro para Sul (FONTE: GOOGLE EARTH, 2009, 2012).

1.2. Objetivos da pesquisa

A escolha desta área para uma pesquisa geofísica está vinculada a um laudo pericial emitido pelo Departamento de Polícia Federal do Paraná, em virtude de uma possível lavra irregular (FIGURA 3A). Entretanto, peritos se depararam com eventuais irregularidades no aterro sanitário, como as observadas na FIGURA 3, que exemplificam o chorume estagnado em valetas (B), a disposição inadequada de lixo (C) e a migração de uma substância organoferrosa oriunda do antigo lixão (D).

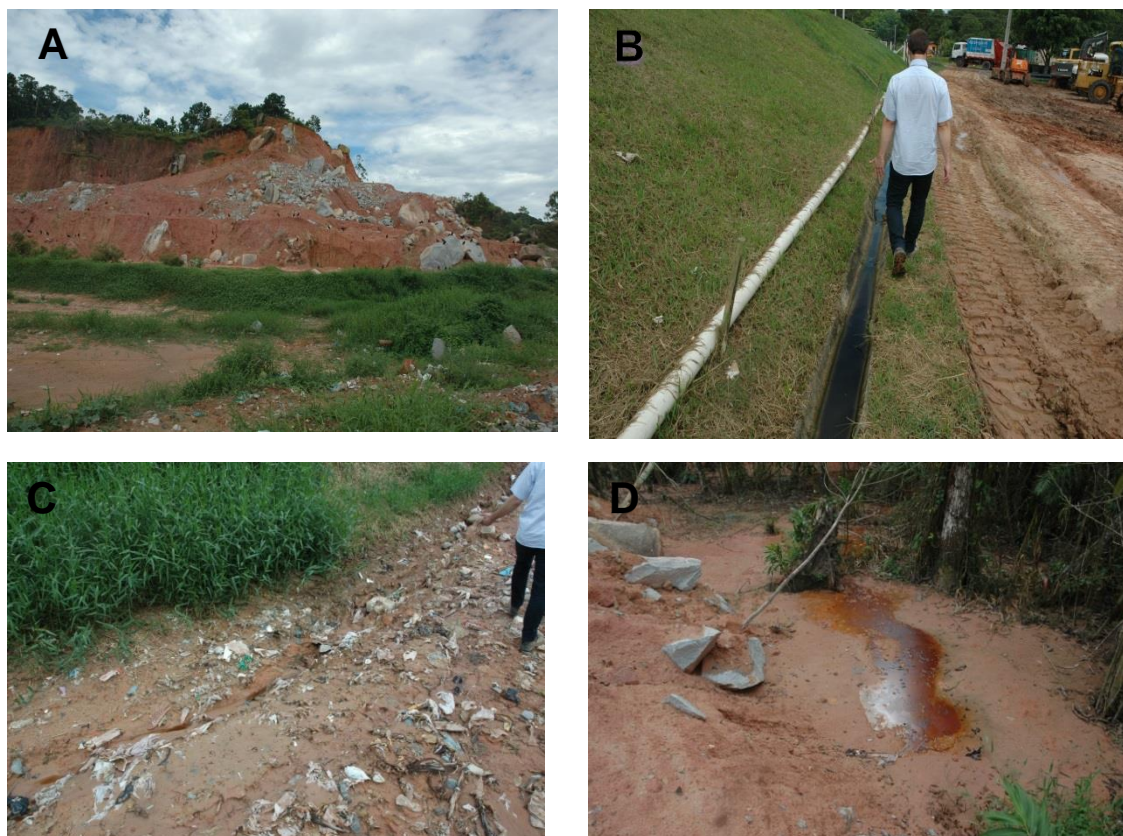


FIGURA 3: As fotos evidenciam: A) Lavra de granito; B) Canaletas com chorume estagando; C) Disposição irregular de lixo; D) Migração de substância organoferrosa oriunda do antigo lixão. Fonte: Polícia Federal-PR (2013).

Em virtude do exposto, quando se realiza uma análise ambiental, o perito criminal se depara com problemas que necessitem o reconhecimento de materiais em subsuperfície, constituindo os métodos geofísicos uma alternativa indireta para medir a variação das propriedades físicas dos materiais, além de fornecerem informações mais rápidas, econômicas e seguras quando comparadas com técnicas diretas de amostragem (BLUM, 2007).

A pesquisa tem como finalidade a aplicação de métodos geofísicos para o delineamento da pluma de contaminação, além de caracterizar o meio geológico da área de pesquisa.

1.3. Integração entre Academia e Criminalística

Conforme, comunicação via e-mail Salvador (2015), as ações, objetivos e os tempos de respostas da criminalística são diferentes da academia. Normalmente os peritos utilizam-se de armas como a caneta e algumas ferramentas disponíveis e precisam indicar e agir sem que existam réplicas ou contraprovas.

A integração entre o meio acadêmico e as Instituições de Segurança Pública ainda é pouco praticada no Brasil, devido à falta de divulgação da ciência forense em todas as instâncias do ensino, bem como a carência de formação de recursos humanos nesta área de pesquisa. Como decorrência, no II Seminário Íbero-Americano de Geologia Forense realizado em Brasília entre 02 e 04 de outubro de 2013, decidiu-se pela criação de um grupo de pesquisa forense no país, apoiado pela CAPES através do Programa Ciências Forenses (Pró-Forenses).

Este programa tem como objetivo principal estimular no Brasil a realização de projetos conjuntos entre os recursos humanos e de infraestrutura disponíveis em diversas instituições de ensino, possibilitando desta forma a produção de pesquisas em Ciências Forenses.

2. Classificação de Resíduos Sólidos

Para os resíduos sólidos existem várias definições, como a da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), número 10.004/04, que os definem como substâncias no estado sólido e semi-sólido¹ oriundas de atividades humanas, hospitalares, industriais, agropecuárias, varrições, além de lodos resultantes de sistemas de tratamento de água, ou aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como líquidos com determinadas particularidades que os tornam inviáveis para lançamento na rede de esgoto ou em corpos de água.

Outra definição é contemplada na Lei nº 12.305/10 e se assemelha muito com a anterior, sendo diferenciada pelo acréscimo de substâncias gasosas contidas em recipientes e leva em consideração a destinação final do resíduo sólido que se procede ou está obrigado a proceder. A classificação de resíduos sólidos nesta lei é dada pela origem e periculosidade, conforme exemplificada a seguir.

2.1. Origem

- Resíduos sólidos urbanos: são os de origem domiciliar, os de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana oriundos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.
- Serviços públicos de saneamento básico: são aqueles gerados pelos estabelecimentos comerciais como restaurantes, supermercados, lojas, bares etc.
- Serviços de saúde: também denominados de resíduos sépticos são os produzidos pelos hospitais, farmácias, postos de saúde, clínicas veterinárias, como agulhas, seringas, sangue coagulado, remédios vencidos, pranchas de raios X.

¹ - Caracteriza-se substâncias ou produtos semi-sólidos como aqueles com teor de umidade inferior a 85% (Manual Gerenciamento integrado de resíduos sólidos, 2001).

- Industrial: originados por diversas indústrias, como as metalúrgicas, petroquímicas, de papel, alimentos, automotivas, etc, sendo bem variados os resíduos gerados como óleos, graxas, lodo, plásticos, metal, entre outros.
- Construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras.
- Agrossilvopastoril: são pautados nas atividades agropecuárias e silviculturas relacionadas a embalagens de adubo, ração, colheita. Quando derivado de pesticidas é considerado tóxico e necessita de tratamento adequado.
- Mineração: relacionados a atividades de pesquisa, extração e beneficiamento de minérios.

2.2. Periculosidade

- Resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- Resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a” da lei 12.305/10, ou seja, resíduos domiciliares.

2.3. Disposição dos Resíduos

No Brasil classificam-se três formas básicas para a disposição dos resíduos sólidos e rejeitos, denominadas lixão, aterro controlado e aterro sanitário, entretanto apenas a última é a melhor forma de destinação. Porém, quando a construção do aterro é inadequada, este pode gerar impactos ao ambiente.

- Lixão ou valas a céu aberto: constitui uma forma inadequada de descarga final a céu aberto, podendo levar a contaminação do terreno em superfície e subsuperfície e dos corpos hídricos.
- Aterro controlado: é uma obra entre o lixão e o aterro sanitário, sendo uma forma menos prejudicial se comparada ao lixão. Não há controle quanto aos

tipos de resíduos depositados. Geralmente não costumam dispor de sistema de impermeabilização do solo e tratamento dos percolados ou do biogás gerado.

- Aterro sanitário: é a forma mais adequada de disposição de resíduos sólidos urbanos, mitigando efeitos de fontes poluidoras para o ambiente e a saúde humana. Sua construção envolve técnicas de engenharia, como a impermeabilização do solo por meio de geomembranas, sistema de recobrimento cuja função é proteger as células do lixo, sistema de drenagem de gases, de águas pluviais, destinação adequada dos gases e confinamento de resíduos e rejeitos, além de sistema de tratamento e drenagem de percolados.

2.4. Disposição no Paraná

O Paraná possui 399 municípios com uma geração de RSU diária de 9.264 t, segundo o Relatório de Diagnóstico de Resíduos Sólidos Urbanos no Paraná emitido em 2012 pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP, 2012). Tal diagnóstico averigou quais os municípios que possuem uma disposição final adequada e em contrapartida verificar aqueles que ainda estão de forma irregular tentando minimizar os impactos causados ao ambiente e, assim, readequa-los.

Os critérios utilizados no Relatório para definir o tipo de disposição final de RSU são os seguintes: (i) áreas com licença ambiental de operação (LO) ou que possuíam LO em vigência, ou com requerimento de renovação protocolados no Instituto Ambiental do Paraná (IAP) foram consideradas aterro sanitários e (ii) áreas sem licença ambiental vigente foram enquadradas como lixão ou aterro controlado.

No Estado do Paraná, 185 municípios (46,4%) dispõem os RSU em aterros sanitários devidamente licenciados pelo IAP, 121 (30,3%) em aterros controlados e 93 (23,3%) em áreas de lixão. Contudo, constatou-se que dos 214 municípios que estão de forma irregular, 62 estão com licenças tramitando no IAP para implantação de aterro sanitário.

Na FIGURA 4 observa-se a distribuição da disposição final dos RSU no Estado do Paraná, bem como as siglas que representam as divisões regionalizadas, como exemplo: ERCBA – Escritório Regional de Curitiba.

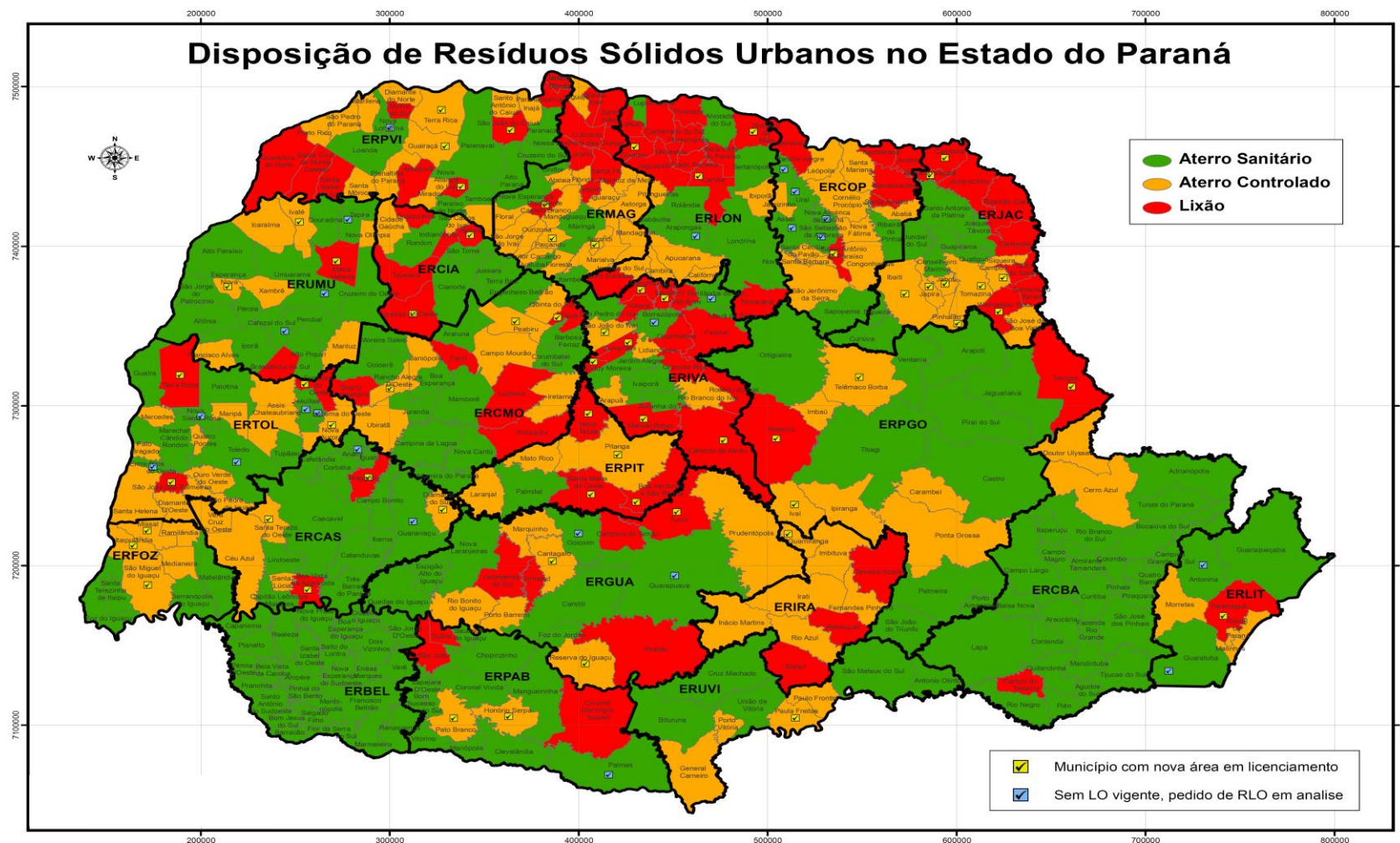


FIGURA 4: Mapa dos municípios do Paraná com a disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (IAP, 2012).

2.4.1. Formação e composição do chorume

Os RSU sofrem processos físico-químicos e biológicos de decomposição e desintegração, originando compostos gasosos e lixiviados (BOSCOV, 2012). Segundo Giordano et al. (2011), a primeira etapa de formação do chorume está relacionada à própria deposição do resíduo no aterro ocasionando um procedimento de perda de água da parte superior para a inferior. Já a segunda etapa diz respeito aos processos anaeróbicos, por meio de reações químicas; e a última etapa está relacionada à água precipitada sobre o aterro e a sua posterior percolação para as massas dos resíduos decompostos.

A água é um dos principais fatores na origem do chorume, e pode ser relacionada a fatores como precipitação, escoamento superficial e variação do nível freático (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

A NBR número 8419/1992, define o chorume como um líquido produzido pela decomposição dos resíduos sólidos, de cor característica escura, mal cheiro, e elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

Nos aterros sanitários a formação do chorume é contínua, e fatores físicos e químicos influenciam no retardo ou na aceleração da deterioração desta substância (GIORDANO et al., 2011). Tais autores citam que a água intersticial dos resíduos sólidos urbanos, a cobertura ou impermeabilização do aterro e o balanço hídrico são os três fatores principais que influenciam a produção do chorume. Entretanto, o balanço hídrico é o de maior importância no que diz respeito à produção de chorume.

2.4.2. Composição físico-química do chorume

O chorume possui uma composição muito variada e está relacionada a alguns fatores principais como a idade e a forma de operação do aterro, a composição dos resíduos, as condições climáticas, o material usado para cobertura, a compactação do resíduo, a temperatura das células, o pH do meio, entre outros.

O chorume contém substâncias tóxicas na forma sólida, líquida ou gasosa e pode conter elevadas concentrações de cloreto, ferro e zinco (MOREIRA et al., 2009). A tabela 1 mostra um decréscimo de alguns dos parâmetros do lixiviado em

função do tempo de residência ou idade dos resíduos, ocorrendo o contrário com o pH.

Ressalta-se ainda que os parâmetros apresentados na tabela 1 são de aterros de outros países, com climas, condições sócio-econômicas e outras variáveis diferentes do Brasil.

O chorume característico de aterros recentes possui alto teor de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos, contudo parte da massa biodegradada é decomposta ao longo do tempo, assim sendo, a concentração destes parâmetros decresce nos lixiviados em aterros mais antigos (Moreira, 2009).

TABELA 1: Variações da composição química em relação às idades dos resíduos.

Parâmetro (mg/L)	Idade do Resíduo			
	0- 5 anos	5- 10 anos	10 – 20 anos	>20 anos
STD	10000-25000	5000-10000	2000-5000	>1000
pH	5-6	6-7	7-7,5	7,5
DBO	1000-25000	1000-4000	50-100	<50
DQO	15000-40000	10000-20000	1000-5000	<1000
N Amoniacal	500-1500	300-500	50-200	<30
P total	100-300	10-100	-	<10
Cloretos	1000-3000	500-2000	100-500	<100
Sulfatos	500-2000	200-1000	50-200	<50
Cálcio	2000-4000	500-2000	300-500	<500
Sódio + Potássio	2000-4000	500-1500	100-500	<100
Magnésio + Ferro	500-1500	500-1000	100-500	<100
Zinco + Alumínio	100-200	50-100	10-50	<10
Alcalinidade	10000-15000	1000-6000	500-2000	<500

(FONTE: BIRKS & EYLES, 1997 citado por MOREIRA et al., 2009).

A seguir são listadas algumas definições dos principais parâmetros de composição físico-química do chorume:

- **Demanda Química de Oxigênio (DQO)**

A DQO se refere à medida de concentração de matéria orgânica em resíduos sólidos e está relacionada à eficácia do tratamento do lixiviado em reatores biológicos. Segundo Contrera (2008), este tipo de análise permite a

medida de um resíduo orgânico em valores da quantidade de oxigênio requerida para oxidação, e está baseada no fato de que toda matéria orgânica pode ser oxidada por meio de um forte agente oxidante em condições ácidas.

As elevadas concentrações de DQO indicam que o lixiviado é jovem, ocorrendo o contrário quando o percolado é mais antigo.

- Demanda Bioquímica de Oxigênio

A DBO é utilizada para medições de poluição orgânica em águas residuais e superficiais, sendo definida como a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar a matéria orgânica degradável em ambiente anaeróbico.

A relação DBO_5/DQO é usualmente utilizada para tratar a biodegradabilidade aeróbia de águas residuais e diminui com a idade do aterro.

Segundo Contrera (2008), razões que giram entre 0,4 e 0,6 indicam que a matéria orgânica no lixiviado é de fácil biodegradação, enquanto valores entre 0,05 a 0,2 indicam lixiviados em aterros antigos. A diminuição dos valores desta razão está relacionada com ácidos húmicos e fúlvicos.

- Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH indica a intensidade de acidez ou alcalinidade do meio estudado, refletindo desta forma a idade do lixiviado, e retrata o processo de decomposição da matéria orgânica. Quando o pH é próximo de 6, o percolado é considerado novo, e há o predomínio de ácidos voláteis.

Contudo, quando os valores estão próximos de 8 (alcalino) o lixiviado é considerado velho e na fase metanogênica aonde os ácidos voláteis são transformados em metano e CO_2 .

- Alcalinidade

Este parâmetro indica a metanização do chorume, e quando o lixiviado apresenta alta alcalinidade maior é a transformação de matéria orgânica em

CO₂ e bicarbonatos (GIORDANO et al., 2011). Alternativamente, íons presentes no meio podem neutralizar os ácidos.

- Sólidos totais dissolvidos

A diminuição da saturação do oxigênio dissolvido e o aumento da turbidez na água está ligada aos sólidos totais dissolvidos e podem ser medidos por meio dos cátions e ânions.

- Nitrogênio

A forma predominante do nitrogênio observada nos lixiviados é a N-amoniacal, a qual é descrita na forma de bicarbonato de amônio e N-amônia livre.

Condição aeróbia e anaeróbia do aterro pode ser diagnosticada pela relação entre a amônia e o nitrato. Quando o aterro encontra-se na condição anaeróbia o nitrato é diminuído a nitrito e em seguida a gás carbônico, contudo nas condições aeróbias a amônia é oxidada para nitrito e posteriormente para nitrato.

- Metais

Uma diversificação de produtos ou embalagens dispostas nos aterros sanitários dá origem aos metais pesados diagnosticados nos lixiviados.

Este líquido normalmente é composto por concentrações de metais como Fe, Zn, Pb, Cd, Cu, Hg e Mn, os quais podem ser prejudiciais aos seres humanos quando em concentrações anormais.

Em aterros jovens pode haver uma elevada concentração desses metais, em decorrência do ambiente ácido, o qual solubiliza os íons metálicos. Entretanto, com o passar do tempo ocorre uma diminuição desta concentração influenciada pelo aumento do pH em decorrência dos metais serem menos solúveis em pH neutro (TCHOBANOGLIOUS & KREITH, 2002)

O chorume/percolado e os seus compostos secundários merecem uma atenção especial nos aterros sanitários, pois quando não controlados ou tratados inadequadamente podem gerar grandes riscos ao ambiente e a saúde humana. Os danos provocados pelo percolado ao ambiente estão relacionados à alteração da qualidade do ar, em decorrência da liberação de gases, poeiras e contaminantes, a degradação do subsolo, bem como a contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

Segundo Oliveira e Brito (1998), alguns aspectos devem ser considerados para entender a migração dos contaminantes no subsolo e nas águas subterrâneas, esses fatores estão relacionados à geologia, geotecnia, hidrogeologia e geomorfologia nos quais o aterro está inserido.

No que se refere ao aspecto geológico, as estruturas rúpteis presentes em rochas ígneas e metamórficas constituem condutos para migração do fluido. Todavia, em rochas sedimentares arenosas a condutividade hidráulica é elevada, o que influencia no transporte do fluido. Por outro lado, minerais argilosos em grande percentagem diminuem a condutividade hidráulica do meio e aumentam a adsorção, dificultando o transporte do percolado.

A contaminação das águas subterrâneas se inicia pela infiltração do percolado no solo, posteriormente adentrando em zonas não saturadas, para finalmente atingir a zona saturada. O fluxo em zonas não saturadas, que são aquelas nas quais os poros são preenchidos por água e ar, é dado de cima para baixo e está relacionado ao formato dos poros e da ação da gravidade. Já em zonas saturadas, aonde os poros são preenchidos por água, a migração está relacionada ao gradiente hidráulico.

Em algumas situações os perfis naturais do solo atuam como processos atenuadores, podendo desta forma amenizar e impedir a contaminação da água subterrânea (ELIS, 1999). A FIGURA 5 ilustra os processos atenuadores que ocorrem no interior de um sistema de água subterrânea, sendo que as faixas em cinza demonstram a importância do processo no solo, na zona não saturada e na zona saturada.

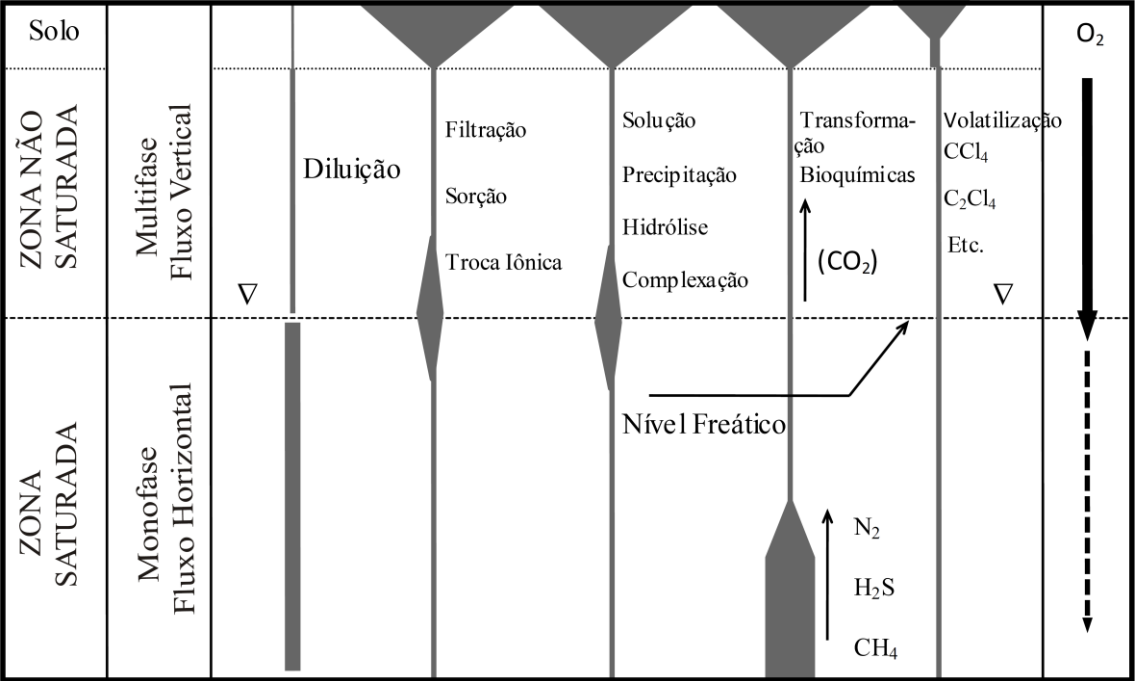


FIGURA 5: Processos que produzem atenuação na contaminação (FOSTER et al. 1987, *apud* ELIS, 1999).

3. Fundamentação Teórica

Neste capítulo abordam-se os princípios fundamentais dos métodos elétricos, (eletrorresistividade e polarização induzida) e eletromagnéticos (GPR e eletromagnético indutivo) aplicados na pesquisa, assim como os parâmetros físicos medidos em campo e as respectivas técnicas de aquisição.

3.1. Métodos Elétricos

3.2. Eletrorresistividade e polarização induzida

Os métodos geoeletricos são datados desde o século XVIII, quando Gray e Wheeler publicaram, em 1720, informações sobre a resistividade das rochas, e o descobrimento, em 1746, por Watson, de que o solo é um condutor (ORELLANA, 1972). O inglês Robert Fox, em 1815 descobriu o fenômeno da polarização espontânea, observado através de depósitos minerais que produzem correntes elétricas fracas até a superfície. Durante este século muitos trabalhos foram efetuados por meio deste método.

No início do século XX, Conrad Schlumberger, na França, e Frank Wenner, no Estados Unidos, utilizaram-se da aplicação de corrente no subsolo para medir a diferença de potencial, esta investigação foi denominada de método eletrorresistividade.

Durante o período entre 1948 e 1960 várias pesquisas foram realizadas em conjunto com empresas de mineração, com o intuito de aperfeiçoar a aplicação do método em pesquisas na área de prospecção mineral (ORELLANA, 1972).

O método eletrorresistividade iniciou-se nas pesquisas ambientais em 1970, após mostrar-se eficiente, enquanto que no Brasil a pesquisa nessa área teve início a partir da década de 1990. Alguns trabalhos realizados com o método geoeletrico por pesquisadores brasileiros serão comentados a seguir.

Em 1996 Elis e Zuquette, através da técnica de caminamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo, definiram os limites da base da cava e as camadas dos resíduos no antigo lixão desativado de Ribeirão Preto-SP. Em 1997, os mesmos

autores utilizaram a técnica de sondagem elétrica vertical e do caminhamento elétrico, no aterro sanitário de Ribeirão Preto, para obter informações da profundidade da zona saturada, fluxo subterrâneo, profundidade do topo rochoso, forma e extensão da pluma de contaminação.

Stevanato et al. (2003) através da integração de eletrorresistividade e de polarização induzida, delimitaram, lateral e verticalmente, a pluma de contaminação no aterro sanitário de Itajaí-SC, em decorrência da associação entre as baixas resistividades (teores anômalos de cloretos) e as baixas cargabilidades (argilas e areia saturadas por soluções salinas).

Santos (2005) avaliou o métodos elétrico e o eletromagnético para determinar a extensão e evolução temporal da pluma de contaminação originada pelo chorume oriundo da decomposição de resíduos sólidos em um antigo depósito de lixo em Cuiabá. A integração destes métodos geofísicos possibilitou caracterizar o nível do freático e a geologia da área, bem como delinear a migração do percolado para o córrego do Camundongo, Cuiabá-MT.

Xavier e Berkenbrock (2005) afirmam que o método eletrorresistividade, através das técnicas de sondagem elétrica vertical e de caminhamentos elétricos, foram eficientes para realizar um pré-diagnóstico das características da área estudada, como definição do material de cobertura, espessura do resíduo, do nível do lençol freático e do fluxo subterrâneo. Os resultados obtidos suportam futuras ações de diagnóstico e remediação, locação de poços de monitoramento e métodos diretos de investigação.

Gallas et al. (2005) utilizaram no depósito de lixo em Londrina-PR, caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, o qual conseguiu mapear o fluxo do contaminante com um sentido principal para Sudeste e ainda houve a descoberta de outro fluxo no sentido para Sudoeste, este relacionado às fraturas ou alterações do substrato rochoso de basalto.

Fachin et al. (2007) fizeram uma comparação de modelagens diretas e inversões de dados de imageamento elétrico 2D no lixão desativado de Ribeirão Preto, e concluíram que a modelagem 2D é uma excelente ferramenta para o delimitar a pluma de contaminação. Em adição verificaram que os resultados obtidos com o arranjo polo-dipolo foram superiores àqueles alcançados com o arranjo dipolo-dipolo.

Silva et al. (2007) por meio da técnica de caminhamento elétrico, arranjo dipolo- dipolo, mapearam a pluma de contaminação na região de Mococa-SP, e a visualizaram em modelos 2D e 3D.

Moura e Malagutti Filho (2007) através dos métodos eletrorresistividade e polarização induzida, por meio da técnica de sondagem elétrica vertical e do caminhamento elétrico (dipolo-dipolo e Schlumberger), avaliaram a potencialidade da integração dos métodos na caracterização do meio geoeletrico. Portanto, a associação dos métodos geofísicos permitiu identificar diferentes litotipos da Formação Corumbatai, bem como, o mapeamento da zona de contaminação por meio da eletrorresistividade. Em contrapartida o IP foi sensível aos resíduos metálicos polarizáveis confinados nas cavas de resíduos, não evidenciando áreas possíveis de contaminação, no aterro controlado de Piracicaba-SP.

Bortolin (2009), em sua Dissertação de Mestrado, demonstrou a eficácia do método geoeletrico, pela técnica sondagem elétrica vertical (SEV) para monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro controlado de Rio Claro-SP. Como resultados obteve a caracterização e identificação geológica de duas formações geológicas distintas e um padrão geoeletrico para a cava de resíduos.

Ustra (2010) investigou uma área a jusante do aterro de Bauru-SP por meio dos métodos de eletrorresistividade e da polarização induzida através da técnica de imageamento 3D. Resultados de modelos 3D de inversão, resistividade e cargabilidade, sugeriram a presença de uma pluma de contaminação fora da cava de resíduos e um sentido predominante do fluxo subterrâneo, sendo assim, constatada pelas altas concentrações de cloretos evidenciadas nas amostras de água analisada dos poços de monitoramento a jusante.

Stevanato et al. (2014) utilizaram caminhamento elétrico com dois espaçamentos do arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=40m$ e $AB=MN=20m$) para diagnosticar e delimitar o confinamento da pluma de contaminação e seus derivados no aterro sanitário de Lages-SC.

3.2.1. Eletorresistividade

O método eletorresistividade foi desenvolvido no início da década de 1900, mas só foi largamente usado a partir dos anos 1970 (REYNOLDS, 2003). Sharma (1997) relata que o método utiliza uma corrente elétrica através do solo e as diferenças de potencial são medidas na superfície. Segundo Keary (2009) o método da eletorresistividade é aplicado no estudo de descontinuidades horizontais e verticais e também na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala e não anômala.

Propriedade elétrica dos materiais

Materiais geológicos diferentes apresentam propriedades físicas distintas, que são importantes para a prospecção elétrica. Dentre as propriedades físicas destacam-se a condutividade elétrica (σ), assim como o seu inverso, a resistividade elétrica (ρ), e a permissividade dielétrica (ϵ). Conforme Telford et al. (1990), a condutividade/resistividade elétrica é a mais importante das propriedades citadas anteriormente e segundo Dentith & Mudge (2014) a condutividade/resistividade são propriedades responsáveis pelo controle das medidas dos métodos eletorresistivimétrico, eletromagnético e potencial espontâneo.

Contudo, essas propriedades dependem da composição mineralógica dos materiais, distribuição da porosidade e da permeabilidade, textura da rocha, fraturamento, temperatura, teor de água, umidade do material, a quantidade, a natureza e a concentração dos sais dissolvidos.

Algumas dessas propriedades são caracterizadas a seguir:

- Constante dielétrica: é uma medida de polarização elétrica resultante da aplicação de um campo elétrico, que pode ser eletrônica, iônica ou molecular e é um parâmetro importante para os métodos eletromagnéticos de alta frequência;
- Condutividade elétrica: é a facilidade do material em conduzir a corrente elétrica, sendo controlada pelos fluidos existentes entre os poros;

- Resistividade elétrica: propriedade do material que resiste ao fluxo de corrente elétrica, também controlada pelos fluidos dos poros e tipo de material.

Resistividade

A primeira Lei de Ohm relaciona a intensidade da corrente (I) que flui através de um condutor e a diferença de potencial (ΔV) necessária para transmitir esta corrente, através da resistência elétrica (R), de acordo com a equação (3.1).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1)$$

Onde: R = resistência elétrica (Ohm)

I = corrente elétrica (Ampère)

ΔV = diferença de potencial (Volt)

A segunda Lei de Ohm caracteriza a resistividade (ρ) como uma propriedade física dada em Ohm.m, sendo determinada pela resistência elétrica (R) de um cilindro de seção transversal (A) e comprimento (L) (FIGURA 6), de acordo com a equação 3.2:

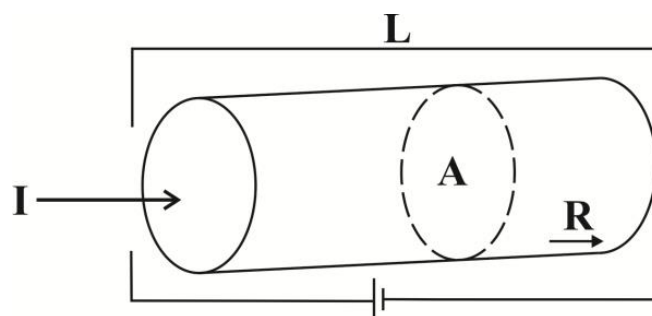


FIGURA 6: Ilustração do esquema de um condutor com a indicação dos parâmetros usados no cálculo da resistividade (KEARY et al., 2009).

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3.2)$$

Onde: ρ = resistividade elétrica (Ohm.m)
 A = área da seção transversal do cilindro (m²)
 L = comprimento do cilindro (m)

A FIGURA 7 ilustra os valores de resistividade e condutividade mais comuns de alguns minerais e das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Através desta figura percebe-se uma grande variação, para um mesmo material, das propriedades físicas citadas.

Os valores elevados de resistividade e baixos de condutividade das rochas ígneas e metamórficas são alterados em decorrência do grau de faturamento e da presença de água nas fraturas. Em contrapartida, as rochas sedimentares, que apresentam maior porosidade e um conteúdo maior de água revelam baixa resistividade e maior condutividade (LOKE, 2004). Materiais ricos em minerais de argila, saprólito e argilitos possuem como característica típica uma baixa resistividade e alta condutividade. Comportamento semelhante é verificado nos sulfetos metálicos com exceção da esfarelita.

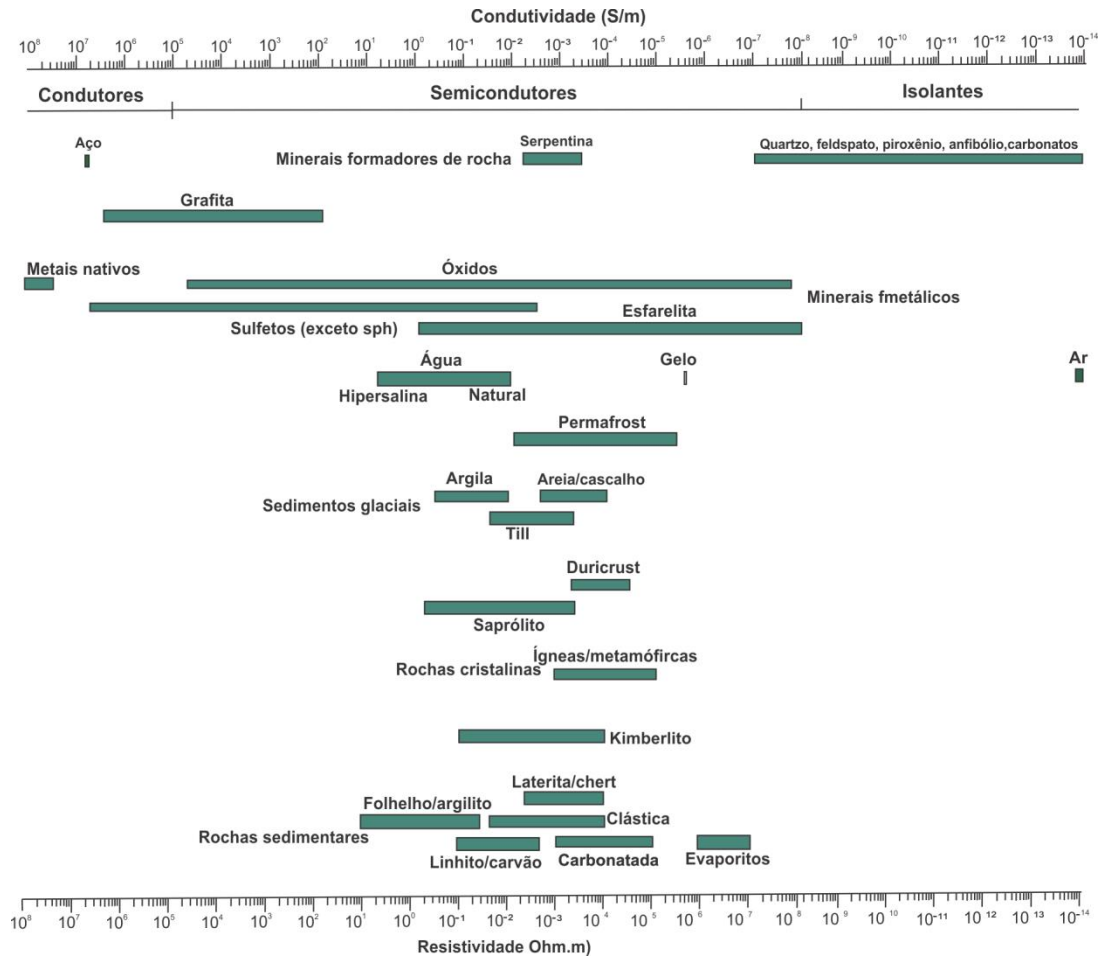


FIGURA 7: Valores de resistividade e condutividade de alguns minerais e rochas (modificado TELFORD et al., 1990)

Segundo Loke (2004), o fluxo da corrente elétrica nos materiais é dado através de dois modos principais:

- **Condução eletrônica:** caracterizada pelo fluxo de corrente de elétrons livres, tais como nos metais e grafita; e
- **Condução eletrolítica:** é o mecanismo principal que ocorre nos materiais geológicos, onde o fluxo da corrente é dado através de íons presentes nas águas contidas nos poros, sedimentos inconsolidados e/ou fissuras existentes nas rochas.

Contudo, alguns autores, como Telford et al. (1990) abordam mais um modo de fluxo designado de condução dielétrica no qual o deslocamento do fluxo da corrente ocorre em meios isolantes com pouca presença de elétrons livres.

Considerando que os minerais formadores das rochas em sua grande maioria são isolantes, a corrente elétrica é conduzida por soluções aquosas, que na maioria

dos casos é composta por água e sais minerais presentes nas estruturas das rochas ou na matriz. Consequentemente, o processo que se destaca na condução da eletricidade nas rochas é o eletrolítico, predominante nos estudos ambientais e de engenharia.

Autores como Orellana (1972), Telford et al. (1990), Ward (1990), Keary et al. (2009) e Dentith e Mudge (2014) abordam princípios que estão relacionados com o fluxo de corrente e o potencial elétrico em subsuperfície. Ao injetar uma corrente elétrica (**I**) por meio de um eletrodo de corrente (**C**) em um determinado ponto da superfície do terreno, e se considerarmos que a subsuperfície seja eletricamente homogênea e isotrópica, as linhas de fluxo de corrente fluem radialmente em relação ao ponto de injeção de corrente determinando assim uma superfície semiesférica - $2\pi r^2$, conforme a FIGURA 8.

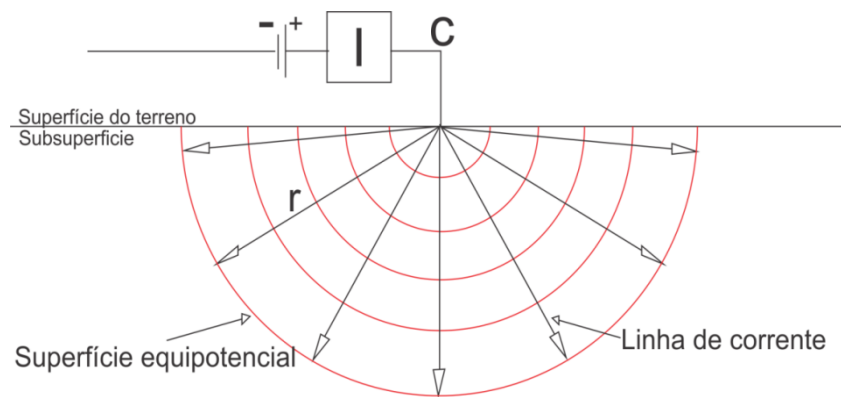


FIGURA 8: Representação idealizada do fluxo de corrente em um ponto C e sua distribuição no semiespaço (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).

Assim sendo, a densidade da corrente (**J**) nada mais é que a corrente elétrica (**I**) dividida pela área da superfície semiesférica (Equação 3.3), sendo que a densidade da corrente diminui com o aumento da distância em relação à fonte de injeção.

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.3)$$

Onde: \vec{J} = densidade de corrente (A/m²)

I = corrente elétrica (A)

r = raio da semiesfera (m)

Então, a densidade de corrente J_r em um determinado ponto da subsuperfície terá a mesma direção e sentido, e será proporcional ao campo elétrico E_r , podendo ser escrito pela Lei de Ohm para meios isotrópicos:

$$E_r = J_r \rho = \frac{I \rho}{2\pi r^2} \quad (3.4)$$

Onde: ρ é a resistividade do semiespaço.

Por outro lado, pode-se definir o potencial elétrico V , a uma distância r dos eletrodos pela integral de E_r entre r e o infinito, ou o eletrodo B, conforme a equação 3.5:

$$V = \int_r^\infty E_r dr = \frac{I \rho}{2\pi r} \quad (3.5)$$

Segundo Telford et al. (1990), quando a distância entre dois eletrodos de corrente é finita, a diferença de potencial em qualquer ponto da superfície será afetada por estes eletrodos. Portanto, quando se considera o método eletrorresistivo com eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) dispostos na superfície, se configura uma nova distribuição de potencial. Deste modo, a diferença de potencial medida nos eletrodos M e N é calculada pelo potencial de cada um dos eletrodos M e N, como segue:

$$Vm = \frac{\rho I}{2\pi r_1} + \left(-\frac{\rho I}{2\pi r_2}\right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB}\right] \quad (3.6)$$

$$Vn = \frac{\rho I}{2\pi r_3} + \left(-\frac{\rho I}{2\pi r_4}\right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB}\right] \quad (3.7)$$

Na equação (3.6) r_1 e r_2 representam as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial designadas como AM e MB. Já na equação (3.7) os r_3 e r_4 representam as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial representados pelas letras AN e NB.

Então, a diferença de potencial entre M e N é calculada pela equação (3.8):

$$\Delta V = Vm - Vn = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}\right] \quad (3.8)$$

Ao se isolar o termo ρ (resistividade elétrica) tem-se a equação (3.9) fundamental quando aplicada em uma subsuperfície homogênea.

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

Resistividade Aparente

A resistividade aparente é um dos conceitos de maior importância na prospecção geolétrica (ORELLANA,1972). Considerando que na natureza os meios, alvos ou corpos investigados são heterogêneos, resulta em campos elétricos e diferenças de potencial distintos quando comparados às medidas em uma subsuperfície homogênea.

A resistividade aparente (ρ_a), portanto, é uma função que depende da distribuição da resistividade verdadeira de cada ponto da subsuperfície, da disposição geolétrica das camadas em subsuperfície e do arranjo geométrico dos eletrodos A, B, M e N. A resistividade aparente (ρ_a) é dada pela equação (3.10):

$$\rho_a = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (3.10)$$

Na equação anterior o fator k depende da disposição geométrica dos eletrodos, ΔV é a diferença de potencial e I é a corrente elétrica. O fator k é representado pela equação geral (3.11):

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad (3.11)$$

A TABELA 2 expressa os fatores geométricos dados para os principais arranjos eletródicos:

TABELA 2: Fatores geométricos dos principais arranjos

Arranjo	Fator Geométrico
Schlumberger	$K = \pi \frac{(X_{AB}/2)^2}{X_{MN}}$
Werner	$K = 2 \cdot \pi \cdot X_{MN}$
Polo-Polo	$K = 2 \cdot \pi \cdot X_{BM}$
Polo-Dipolo	$K = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot X_{MN}$
Dipolo-Dipolo	$K = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot X_{MN}$

(FONTE: DENTITH & MUDGE, 2014).

3.2.2. Polarização Induzida (IP)

A polarização induzida pode ser obtida através de um conjunto de eletrodos de corrente e de potencial, ou seja, aplicando-se aquisições com configurações de arranjos semelhantes aos mencionados na eletrorresistividade.

Ao se interromper uma corrente elétrica que circula no terreno, a voltagem entre os eletrodos de potencial não decai instantaneamente para zero, mas gradualmente até o estado estacionário. O fluxo de corrente faz com que apareçam concentrações de cargas em várias partes de um semiespaço, e, após a interrupção da corrente, as cargas elétricas retornam à sua posição original, enquanto o voltímetro continua com um sinal fraco. Por algum tempo, minutos ou segundos, uma pequena porção da fração da voltagem inicial permanece no terreno enquanto as concentrações de carga são dissipadas (REYNOLDS, 2003).

Para um fluxo ininterrupto de corrente, a polarização induzida depende da impedância do terreno e da frequência da corrente. Define-se impedância como a resistência aparente de uma substância frente ao fluxo de correntes alternadas, de forma análoga à resistência de um circuito elétrico.

O fenômeno da polarização induzida pode ser observado nos domínios do tempo e da frequência, entretanto nesta dissertação será mencionado apenas o domínio do tempo. Apesar de ser complexo, o *IP* assemelha-se à descarga de um capacitor (domínio do tempo) ou à variação de impedância de uma corrente alternada (domínio da frequência).

No domínio do tempo, as medidas são feitas pela passagem de pulsos de corrente contínua no terreno, com duração $T(s)$, e ΔV é a voltagem remanescente de um tempo finito (t) após o corte da corrente. A magnitude da polarização induzida (*IP*) é frequentemente expressa em $\Delta V/V$ (milivolt/volt), onde V é a voltagem medida enquanto a corrente circula. Normalmente, um pulso de corrente é enviado num determinado sentido, e em seguida no sentido oposto, procedendo-se as leituras de *IP*. Frequentemente, o tempo de *cut-off* (t) é da mesma ordem de grandeza do tempo T . A FIGURA 9, ilustra a curva de decaimento de *IP*.

Segundo Braga (2003) o decaimento da curva de descarga $\Delta V_{ip} = f(t)$ varia em função do tempo, e a amplitude da voltagem residual em um tempo t qualquer depende da maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem.

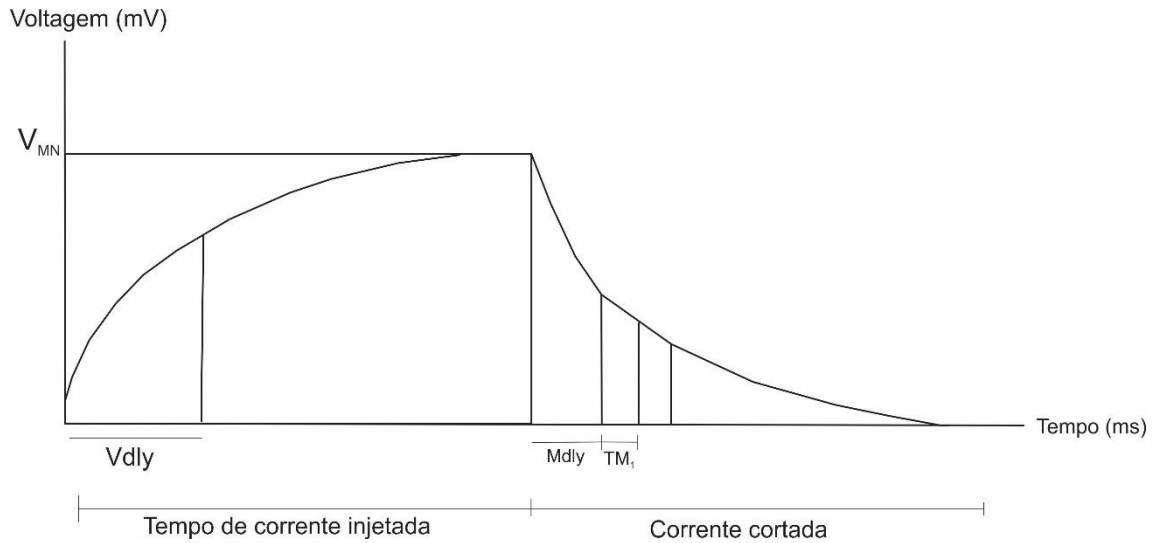


FIGURA 9: Curva de decaimento *IP* (Fonte: manual de operação do *ELREC PRO*).

Normalmente, o *IP* pode ser representado pela integral da área sob a curva de decaimento, entre dois tempos t_1 e t_2 , após a interrupção da corrente, normalizado pela voltagem primária (V_0). Esta medida é conhecida como cargabilidade aparente (M_a), de acordo com a equação 3.12.

$$M_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V_t dt \quad (3.12)$$

Mecanismos de polarização induzida

O armazenamento de energia elétrica nas rochas é dado através de processos eletroquímicos ocasionando duas formas distintas de polarização induzida: a eletrônica ou metálica e a de membrana (REYNOLDS, 2003).

Polarização eletrônica ou metálica

A polarização eletrônica é típica de rochas que contêm minerais metálicos, como sulfetos e mineral de grafita. O comportamento do fluxo de corrente em parte é eletrônica e em parte eletrolítica, e acontece um efeito de polarização quase semelhante ao da membrana.

Quando íons fluem pelos poros em decorrência de um potencial elétrico aplicado, eles podem se deparar com minerais eletronicamente condutivos, ocasionando uma barreira que impede o fluxo da corrente. Isto ocorre devido à superfície dos minerais metálicos serem compostas por íons que formam uma película fixa de carga molecular nesta interface do grão.

A superfície do grão metálico atrai íons positivos e negativos, que perfazem a solução aquosa, formando uma camada com espessura variável e com alguma mobilidade, de acordo com a FIGURA 10.

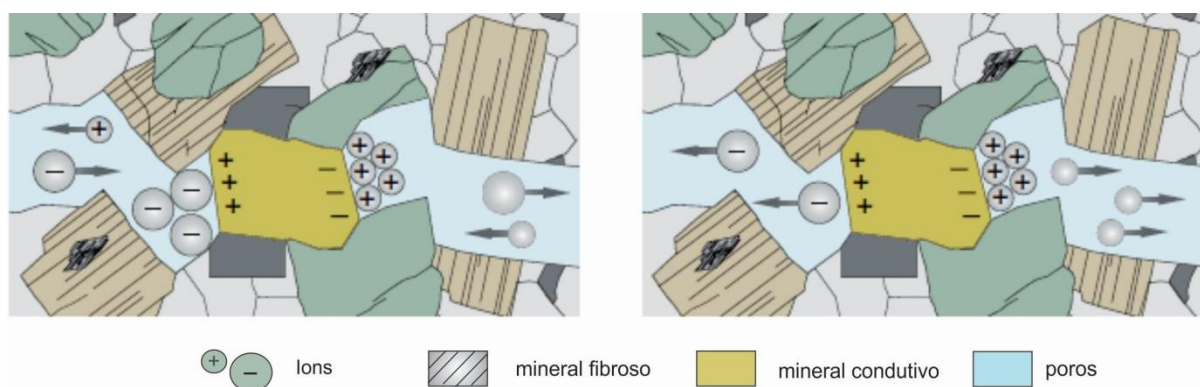


FIGURA 10: Representação do modelo idealizada para o fenômeno da polarização metálica resultante da barreira originada pelos íons na superfície do grão metálico. Situação original (A) e após a aplicação de corrente elétrica (B) (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).

Polarização de membrana

O fenômeno da polarização de membrana se deve à diferença de mobilidade entre ânions (-) e cátions (+) resultante do fluxo de corrente nos poros, o que ocorre na maioria dos minerais presentes nas rochas. Na interface entre os minerais e o fluido, as cargas negativas atraem os íons positivos criando uma camada de superfície, ou membrana (FIGURA 11, esquerda).

Ao se gerar um potencial elétrico os minerais atraem os cátions que formam uma espécie de barreira, que impede o fluxo dos íons de ânions entre os poros. Este impedimento de fluxo ocorre devido à concentração local das cargas negativas sobre um dos lados da barreira e deficiência no outro lado, o que resulta numa polarização eletrolítica, de acordo com a FIGURA 11 (direita). Assim sendo, a mobilidade dos íons é afetada pela concentração das cargas que se opõem ao fluxo de corrente.

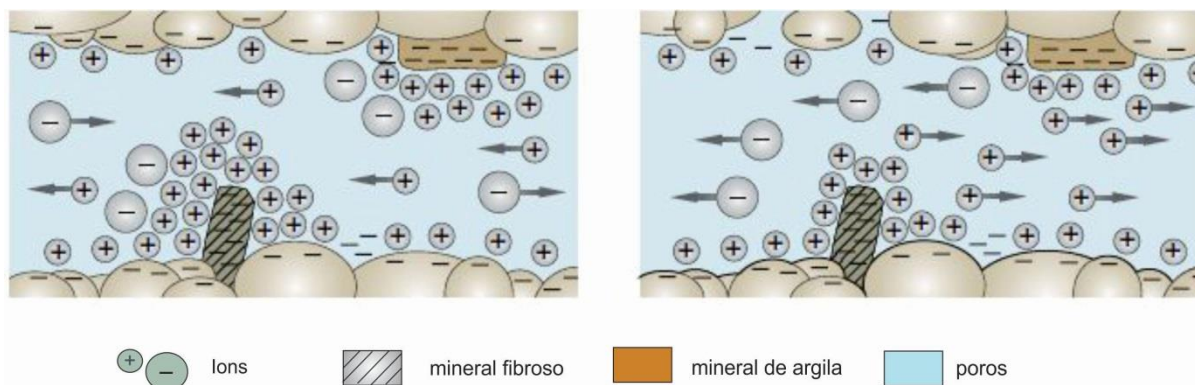


FIGURA 11: Representação do modelo idealizada para o fenômeno da polarização de membrana originada por mineral de argila e minerais fibrosos (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).

Segundo Telford et al. (1990) este tipo de fenômeno é muito pronunciado em minerais de argila, em decorrência de concentrações de cargas negativas na superfície dos grãos atraindo dessa forma grande quantidade de nuvens de cátions. Outro fator que influencia a polarização de membrana é a salinidade do fluido, pois quanto maior a concentração de sais menor será a magnitude da polarização, como decorrência de caminhos alternativos que o fluxo de corrente encontra na rocha.

Segundo Dentith & Mudge (2014), para que ambas as polarizações, de membrana e metálica, ocorram é necessário à existência de porosidade e permeabilidade significativas, além de eletrólito apropriado nos poros. Assim como acontece com a condutividade, a textura, a forma e o tamanho dos grãos, a temperatura e a quantidade de material argiloso influenciam a polarizabilidade dos materiais estudados.

3.2.3. Técnicas de aquisição

Nos métodos denominados eletrorresistividade e polarização induzida, os dados de resistividade aparente e de cargabilidade média aparente dos materiais geológicos podem ser adquiridos por diversas técnicas e arranjos. Existem diversas disposições geométricas dos eletrodos usados na aquisição dos dados, sendo que a escolha depende do objeto a ser estudado, da situação geológica e ainda da qualidade das informações, segundo Loke (2004).

Existem três modos distintos de aquisição de dados denominados Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Caminhamento Elétrico (CE) e Perfilagem Elétrica de Poços

(PCE). Neste capítulo será abordado a SEV e o CE, uma vez que ambos foram aplicados nesta pesquisa.

A sondagem elétrica vertical é caracterizada pela investigação 1D e pela determinação vertical de um parâmetro físico medido em campo, resistividade aparente, em um ponto central da subsuperfície. Os eletrodos de corrente e potencial são alinhados com a mesma orientação durante a aquisição, seguido da abertura crescente dos eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN). Normalmente para esta técnica são empregados os arranjos Schlumberger e Wenner.

Para aquisição da SEV utilizou-se o arranjo Schlumberger conforme a FIGURA 12. Neste arranjo, a distância entre os eletrodos de potencial MN deve ser bem menor que a separação dos eletrodos de corrente AB, contemplando a relação $MN < AB/5$.

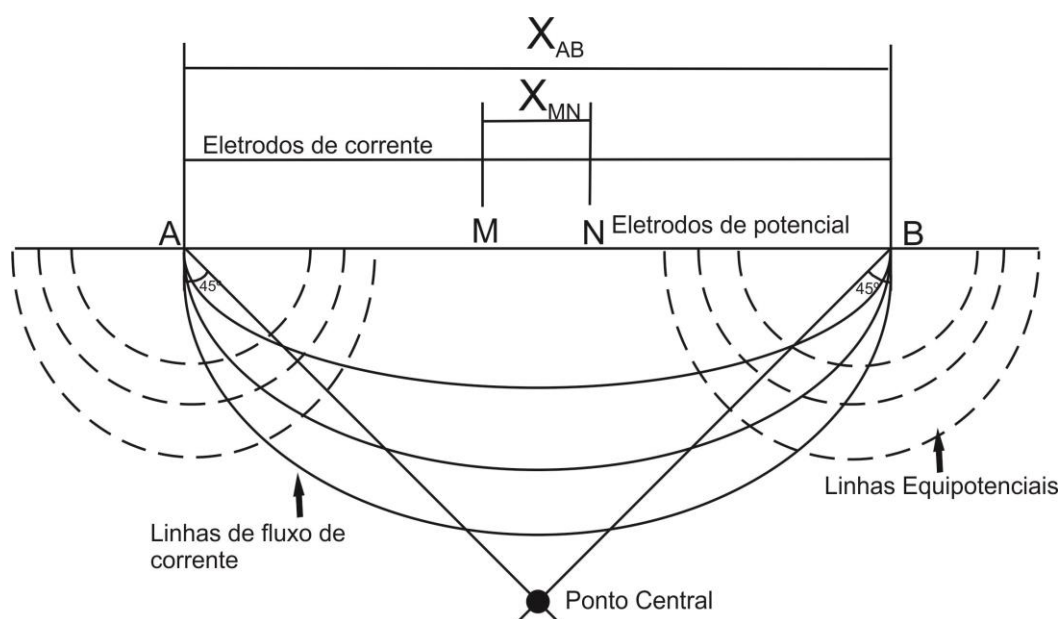


FIGURA 12: Representação gráfica das linhas de correntes e equipotenciais na técnica de aquisição da sondagem elétrica vertical (SEV) (modificado de DENTITH & MUDGE, 2014).

Durante o processo de investigação, no campo, é usada uma manobra denominada embreagem, que se caracteriza pela verificação da qualidade das medidas, e é aplicada quando se verifica uma diminuição no valor de ΔV . Esta verificação é realizada pela expansão de MN, seguida de leituras de potencial para

distintos AB. Salienta-se que os eletrodos de corrente e potencial não devem ser deslocados ao mesmo tempo e a relação entre os mesmos deve ser mantida.

Os dados de resistividade aparente são plotados em gráficos bi-logarítmicos, com $AB/2$ (m) na abscissa e a resistividade aparente (Ohm.m) na ordenada. Como resultado observa-se uma curva, a qual pode ser interpretada quantitativamente, por inversão, através de *software* adequados. A interpretação pelo método direto consiste em admitir um modelo inicial e posteriormente realizar ajustes e aproximações entre os dados observados e calculados.

A técnica do caminhamento elétrico é utilizada para averiguar variações laterais e verticais de resistividade/IP em profundidade, a partir de medições realizadas na superfície. Diversas são as configurações de eletrodos que podem ser utilizadas no caminhamento elétrico como os arranjos dipolo-dipolo, gradiente, Wenner, Schlumberger, entre outros.

Um fator de destaque é a profundidade de investigação, pois ela depende de outros fatores, além da resistividade do meio como o efeito da cobertura, sensibilidade às heterogeneidades, topografia, etc.

Edwards (1977) através da utilização de coeficientes empíricos propôs profundidades efetivas de investigação para alguns arranjos eletródicos. A TABELA 3 mostra a profundidade média de investigação para o arranjo dipolo–dipolo

TABELA 3: Profundidade efetiva de investigação para o arranjo dipolo – dipolo.

Arranjo Eletródico	Níveis de investigação							
Dipolo-Dipolo	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8
Ze/a	0,416	0,697	0,962	1,220	1,476	1,730	1,983	2,220
Ze/L	0,139	0,174	0,192	0,203	0,211	0,216	0,220	0,250

(FONTE: adaptado de EDWARDS, 1977).

Portanto, para se determinar a profundidade efetiva de investigação, deve-se multiplicar o espaçamento “a” ou o total do comprimento do arranjo “L” pelo fator de profundidade (**Ze**).

O arranjo dipolo-dipolo e polo-dipolo é o mais utilizado em levantamentos de eletrorresistividade e polarização induzida (*IP*) devido ao baixo acoplamento eletromagnético entre os circuitos, segundo Loke (2004).

Ainda segundo esse autor, o espaçamento entre os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) é fixo e expresso pela letra **a** ou **X**, ou seja, **a=AB=MN**. Quando a distância R entre os eletrodos de corrente e potencial aumenta, conseqüentemente há um incremento na profundidade dos níveis (n) de investigação.

O nível (n) é dado pela intersecção entre as linhas que partem do centro dos eletrodos de corrente (**AB**) e dos eletrodos de potencial (**MN**), formando ângulos de 45° , conforme a FIGURA 13 (HALLOF, 1957).

O padrão de sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo mostra que os maiores valores estão próximo aos eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN), indicando que este arranjo é adequado para mapear estruturas verticais e encerra uma boa resolução lateral.

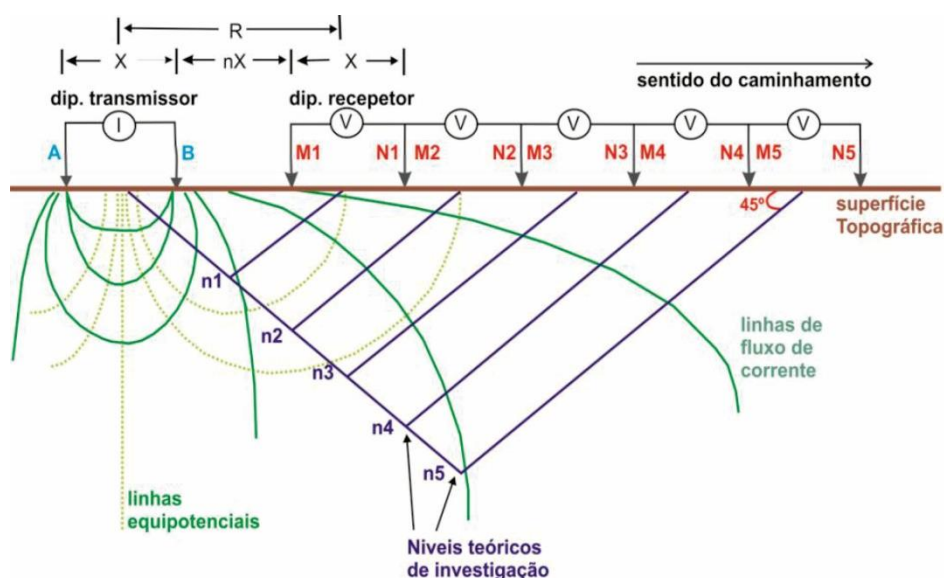


FIGURA 13: Representação do arranjo dipolo-dipolo (ELIS, 1999).

3.2.4. Pseudoseção

Os dados de resistividade aparente e cargabilidade global aparente são representados na forma de pseudoseções, e tem como objetivo identificar zonas anômalas no meio investigado. A interpretação de uma pseudoseção ocasiona ambiguidades, pois os parâmetros resistividade, cargabilidade e profundidade são aparentes. Portanto, é necessário recorrer a *software* de inversão para construção dos modelos de profundidade, como ilustrado na FIGURA 14.

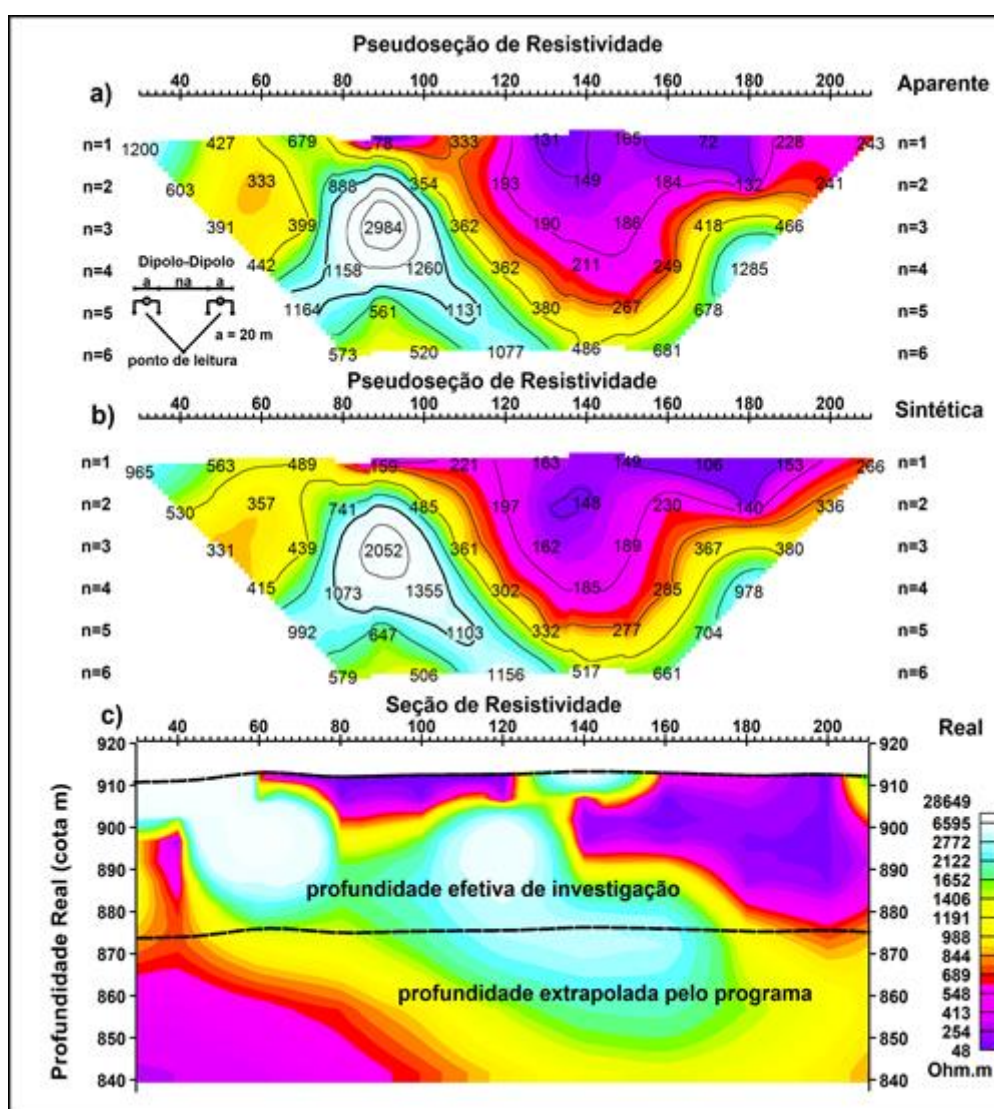


FIGURA 14: Pseudoseção de resistividade aparente (a), sintética (b) e o modelo de profundidade obtido por inversão (c) (STEVENATO et al., 2014).

3.2.5. Método de inversão da pseudoseção

Para diminuir a ambiguidade na interpretação é indispensável a aplicação da modelagem numérica através de inversão (FACHIN *apud* BARKER 1992; LOKE, 2004), a qual permite gerar modelos de profundidade, resistividade e cargabilidade reais, facilitando a localização e a profundidade das anomalias. De acordo com Loke (2004), todos os métodos de inversão tentam essencialmente determinar um modelo de subsuperfície cuja resposta mais se aproxime dos dados obtidos.

O programa usado para a modelagem foi o *Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP*, da *Geosoft/Interpex*, o qual é baseado em células que representam os dados de resistividade e de cargabilidade aparentes. Este programa usa um método iterativo de inversão denominado *smoothness-constrain* (de GROOT-HEDLIN e CONSTABLE, 1990) que é uma técnica de otimização de mínimos quadrados não lineares, expresso pela equação:

$$(JTJ + uF) * d = J^T g - u Fr \quad (3.13)$$

Onde F = uma matriz de suavização; J = uma matriz jacobiana das derivadas parciais; r = um vetor do logaritmo dos valores de resistividade modelada; u = fator de amortecimento; d = vetor de perturbação do modelo e g = vetor de discrepância.

O vetor de discrepância **g** contém a diferença entre os valores calculados e medidos de resistividade e cargabilidade. A magnitude deste vetor é frequentemente dada como um valor do erro médio quadrático - *rms* (*root-mean-square*). O vetor de perturbação do modelo (**d**) é uma variação dos valores de resistividade, calculados a partir da equação (3.13), aprimorando o modelo resultante. A combinação de dois parâmetros, representados pela diferença entre os valores de resistividade e de cargabilidade, medidos e calculados, assim como a irregularidade ou rugosidade de tais valores são minimizados com a equação (3.13) (LOKE, 2004).

3.3. Métodos Eletromagnéticos

3.3.1. Eletromagnético Indutivo (EM)

Os métodos eletromagnéticos indutivos (EM) empregam campos eletromagnéticos gerados por correntes alternadas de origens artificiais ou naturais. Segundo Mcneill (1980) este método é aplicado em vários delineamentos para delineamento em regiões com *permafrost*, localização de depósitos de cascalhos, identificação de intrusões salinas, mapeamento de pluma de contaminação em subsuperfície, detecção de objetos metálicos, arqueologia, prospecção mineral.

O parâmetro físico medido é a condutividade elétrica ou condutividade solo (σ) dos alvos localizados em subsuperfície por meio dos campos eletromagnéticos induzidos no terreno (MCNEILL, 1980). A resposta é expressa em Siemens por metro (S/m), milisiemens por metro (mS/m) ou em outras subunidades.

O método consiste em uma bobina transmissora (TX), energizada por um fluxo de corrente alternada no terreno, o qual é captado pela bobina receptora (RX), separadas por uma distância (**s**). A FIGURA 15 representa o modelo esquemático do método eletromagnético indutivo.

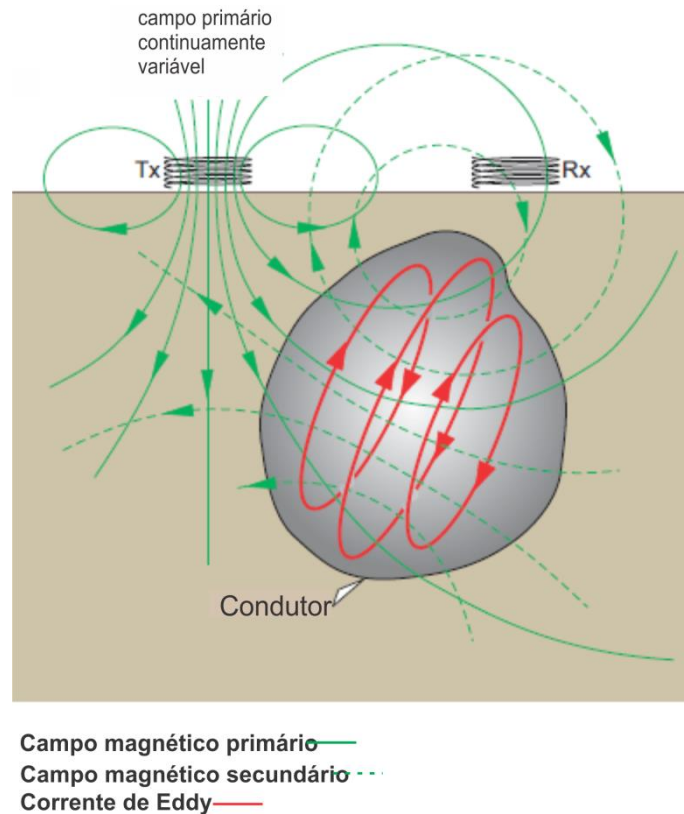


FIGURA 15: Representação do modelo esquemático do método eletromagnético indutivo (modificado de DENTITH & MUNDGE ,2014).

O campo magnético produzido pela corrente alternada da bobina transmissora induz um campo magnético denominado primário (H_p). Na presença de um condutor são geradas correntes denominadas *eddy currents*. Estas correntes geram um campo secundário (H_s). Assim sendo, a bobina receptora capta um campo resultante da interação dos campos primário e secundário.

Os campos eletromagnéticos são atenuados exponencialmente durante a propagação no meio investigado. O *skin depth* é definido como a profundidade onde a amplitude do campo é reduzida pelo fator e^{-1} da amplitude inicial (Equação 3.14):.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.14)$$

Onde:

δ = skin depth

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular;

μ = permeabilidade magnética;

f = frequência do campo eletromagnético;

σ = condutividade elétrica.

A razão do espaçamento (s) entre as bobinas e o *skin depth* (δ) é conhecida como número de indução (B), e é dada pela razão:

$$B = \frac{s}{\delta} \quad (3.15)$$

Assim, quando o número de indução é muito menor do que 1, a razão entre H_s e H_p no receptor é diretamente proporcional a condutividade aparente, a qual é dada pela equação 3.16 :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (3.16)$$

Existem diversas maneiras de orientar as bobinas (transmissora e receptora), a (FIGURA 16) ilustra os arranjos mais usados na aquisição de dados.

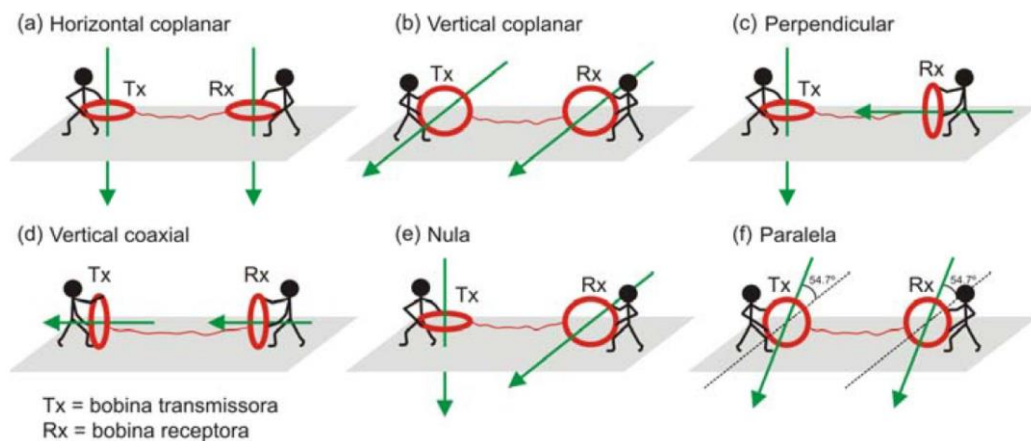


FIGURA 16: Configurações comuns das bobinas dipolares (BORGES, 2007).

A TABELA 4 exemplifica os parâmetros de frequências de operação do equipamento, bem como as profundidades teóricas de exploração e o espaçamento entre as bobinas (MACNEILL, 1980).

TABELA 4: Relação entre espaçamentos entre as bobinas, frequência de operação, profundidades DMH e DMV, para sistemas eletromagnéticos indutivos.

Espaçamento entre as bobinas (m)	Frequência de operação (kHz)	Profundidade de operação para Dipolo Horizontal	Profundidade de Operação para Dipolo Vertical
10m	6,4kHz	7,5m	15m
20m	1,6kHz	15m	30m
40m	0,4kHz	30m	60m

3.3.2. Ground Penetrating Radar- GPR

O primeiro trabalho a utilizar pulsos de onda com o objetivo de localizar objetos enterrados foi realizado por Hulsenbeck (1926), *apud* Reynolds (2003).

Uma das primeiras discussões sobre o uso de GPR na localização de túmulos foi feita por Bevan (1991). Strongman (1992) publicou uma série de estudos de caso de enterro de carcaças de ursos em ambiente controlado, e perfis de cenas de crimes reais. Em 1929, na Áustria, houve uma investigação com GPR para verificar a espessura de uma geleira (OLHOEFT, 1996).

Miller (1995) fornece uma boa revisão dos trabalhos desenvolvidos, incluindo o uso de GPR, para localizar túneis subterrâneos no Vietnã, áreas contaminadas por poluentes líquidos e explosivos plásticos.

Reynolds (2003) também fornece informações sobre o uso de GPR pelo exército dos EUA na localização de túneis na guerra do Vietnã. O período entre 1960 e 1965 foi marcado por investigações polares através de institutos de pesquisas. Durante a década de 1970, pesquisas foram desenvolvidas para compreender melhor a geologia, como às realizadas pelo Serviço Geológico do Canadá com o intuito de entender a *permafrost* do Ártico do Canadá.

Segundo Annan (2002), no período entre 1990 a 2000 muitos grupos se interessaram por esta tecnologia desenvolvendo estudos sobre aquisição de dados, simulações numéricas em 2D, processamento digital de dados, aplicações em arqueologia e pesquisas ambientais, além do uso do GPR para caracterizar fácies estratigráficas em geologia.

No Brasil, os trabalhos pioneiros surgiram no Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) realizados por Porsani e Rodrigues, a partir de 1997. Para aprofundar estudos de geofísica rasa e testes de equipamentos foi criado pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), um Sítio Controlado de Geofísica Rasa – SCGR (PORSANI, 2004).

Borges (2002) caracteriza os sedimentos e o topo do embasamento cristalino da Bacia de São Paulo a partir de métodos geofísicos (*ground penetrating radar*, sondagem elétrica vertical e caminhamentos elétricos).

Kahwage et al. (2005), empregam o GPR para identificação de zonas anômalas caracterizadas pela atenuação do sinal da onda eletromagnética, quando relacionadas com hidrocarbonetos no solo.

Oliveira et al. (2009), a partir da integração dos dados geofísicos (GPR) e investigações diretas contribuem para o entendimento do arcabouço geológico essencial para estudos ambientais.

Porsani et al. (2011) mostram que GPR e SEV possibilitaram caracterizar o nível de água, zonas contaminadas e o contato entre as formações Rio Claro e Corumbataí, na vizinhança do aterro sanitário de Rio Claro-SP.

Cavalcanti (2012) mostra a versatilidade do GPR para delinear a pluma de contaminação e identificar a geometria das cavas de resíduos. Através da associação de dados elétricos, geologia dos poços e informações geoquímicas das águas coletadas foi possível ao referido autor construir modelos geológicos-geofísicos e caracterizar áreas contaminadas, suspeitas e não contaminadas.

O GPR é utilizado para gerar imagens de alta resolução da subsuperfície com ondas de rádio de alta frequência (10 – 3500 MHz), com base nos princípios físicos da propagação de ondas eletromagnéticas. Quando se perturba uma partícula eletricamente carregada, sua propagação gera um campo eletromagnético (EM), que varia com o tempo e reflete uma integração entre os campos elétrico (E) e magnético (H).

Autores como Davis (1989), Annan (1992) e Porsanni (1999) citam que o GPR é um método análogo à reflexão sísmica e sonar, entretanto usa ondas eletromagnéticas. O método é baseado na teoria eletromagnética a qual é fundamentada nas equações de Maxwell. A primeira corresponde a Lei de Faraday (Equação 3.17) onde a variação do campo magnético no tempo ($\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$) resulta em um campo elétrico (\vec{E}):

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (3.17)$$

A segunda é a Lei de Ampère (Equação 3.18) a qual descreve que um campo elétrico variável no tempo ($\frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$) produz um campo magnético (\vec{B}):

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (3.18)$$

onde:

\vec{J} = a densidade de corrente de condução,

μ_0 = permeabilidade magnética

ε_0 = permissividade dielétrica.

Para se relacionar as equações de Maxwell com o meio existente é necessário que elas descrevam as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais, denominadas de relações constitutivas que permitem compreender a interação entre o campo eletromagnético e o meio estudado, em decorrência da condutividade elétrica (σ), da permissividade dielétrica (ε_0) e da permeabilidade magnética (μ). Essas propriedades são de grande importância para as respostas fornecidas pelo GPR, segundo Annan (2001), e são descritas pelas equações a seguir:

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \quad (3.19)$$

$$\vec{D} = \varepsilon * \vec{E} \quad (3.20)$$

Onde : E = campo elétrico;

\vec{J} = densidade da corrente;

σ = condutividade elétrica;

\vec{D} = polarização;

ε = permissividade dielétrica.

Segundo Keller (1987), a passagem de um estado de equilíbrio para um estado polarizado dos elétrons, núcleos e/ou moléculas é decorrente da injeção de um campo elétrico externo, ocasionando dois tipos de corrente nos materiais: corrente por condução (J_c) e corrente por deslocamento (J_D), FIGURA 17.

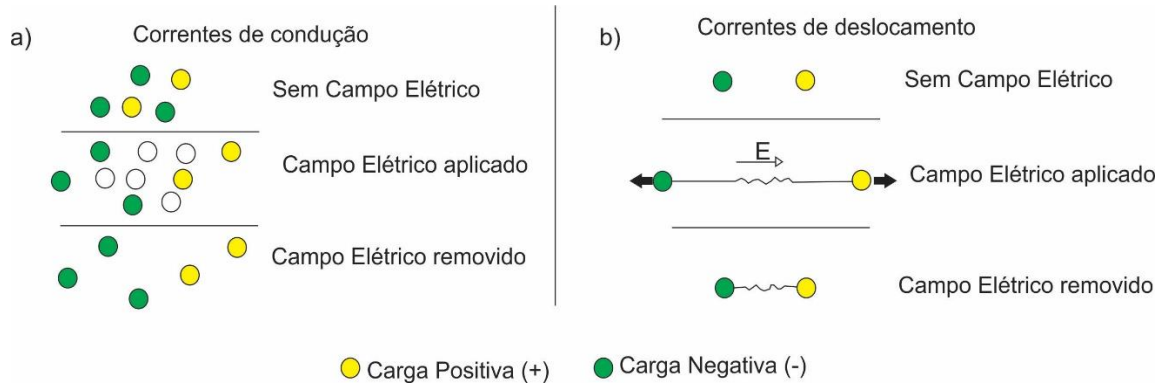


FIGURA 17: Distribuição de cargas por corrente de condução (a) e distribuição de cargas por corrente de deslocamento (b) (ANNAN, 1992).

O primeiro tipo de corrente corresponde à Lei de Ohm (equação 3.19), onde a condutividade elétrica (σ), é expressa em Siemes por metro (S/m), ou no caso do GPR mS/m ($1\text{mS} = 10^{-3}\text{S}$). Para ocasionar este fluxo, um campo elétrico é aplicado e as cargas livres passam a se deslocar. Quando este campo é interrompido as cargas desaceleram até retornar ao equilíbrio.

Já a corrente de deslocamento (J_D) é representada pela razão da variação da densidade ou polarização em função do tempo, conforme a equação (3.21). Portanto, quando um campo elétrico é aplicado, a carga rompe seu estado de equilíbrio e armazena energia para seu deslocamento, contudo, quando este campo é interrompido a energia desta carga é liberada fazendo com que retorne ao seu estado estacionário original. Este processo gera um momento de dipolo no material.

$$J_D = \frac{d\vec{D}}{dt} \text{ ou } J_D = \frac{d(\epsilon \cdot \vec{E})}{dt} \quad (3.21)$$

A composição das correntes de condução, de deslocamento e a aplicação do campo elétrico (E) geram uma densidade de corrente total (\vec{J}_T) que flui no material, representada pela equação (3.22):

$$J_T = J + J_D \text{ onde } J_D = \frac{d(\epsilon \cdot \vec{E})}{dt} \quad (3.22)$$

Para Annan (2003) as propriedades dos campos eletromagnéticas são a velocidade (v), a atenuação (α) e a impedância eletromagnética (Z), contudo, quando estas propriedades estão relacionadas com um meio simples – permissividade, condutividade e permeabilidade constantes – elas são mais facilmente expressas por uma função senoidal do tempo. A frequência de transição

separa uma mudança de difusão para um comportamento de propagação da onda sendo que para um material simples (F_t) é dada pela equação (3.23).

$$Ft = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon} \quad (3.23)$$

Abaixo desta frequência ocorre predomínio da condução (J_c), seguida de dispersão da energia, e se propaga com uma velocidade constante nos materiais. Contudo, a maioria dos métodos eletromagnéticos trabalha com baixa frequência.

Quando a frequência é superior à (F_t) há a predominância da corrente por deslocamento (J_d), característica de propagação da energia, a qual é relacionada com o método GPR. Todavia, neste método devem-se considerar as duas correntes, prevalecendo a corrente de deslocamento sobre a corrente de condução.

As propriedades condutividade elétrica e a permissividade dielétrica dos materiais são dependentes da frequência de excitação (ω), de acordo Annan (1992), ou seja,

$$\omega = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.24)$$

Quando as frequências são superiores à (F_t), a propagação das ondas está relacionada com a velocidade (v) (Equação 3.25) e a atenuação (α) (Equação 3.26) durante o percurso (FIGURA 18). Entretanto, esses dois parâmetros são diretamente influenciados pela permissividade dielétrica, que atua na velocidade de propagação, e pela condutividade elétrica, que interfere na atenuação das ondas, segundo Annan (1992):

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} = \frac{3.10^8}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (3.25)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2 \cdot \sqrt{K}} \quad (3.26)$$

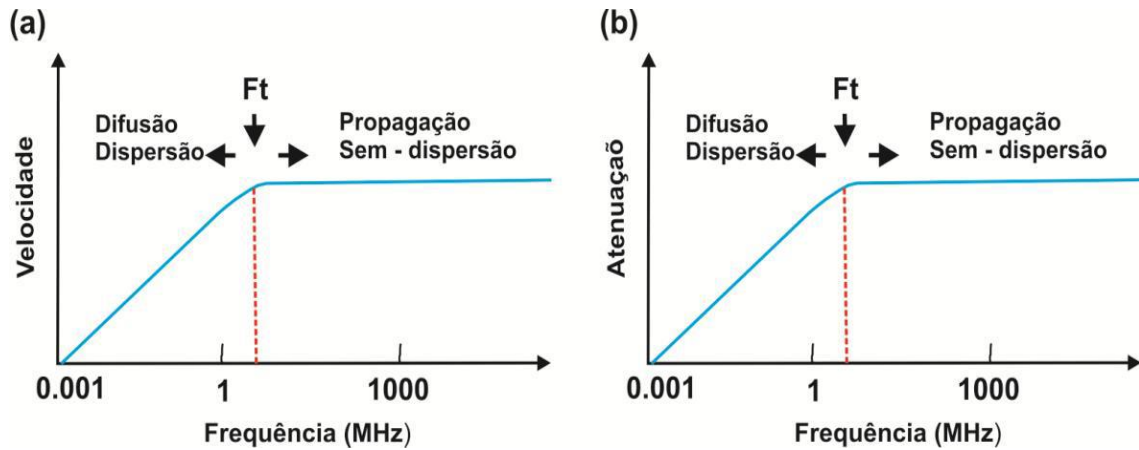


FIGURA 18: Variação da velocidade e da atenuação pela frequência, evidenciando a frequência de transição entre a dispersão e a propagação da onda (JOL, 2009).

Na FIGURA 18 observa-se que nas altas frequências, acima da F_t , todas as componentes de frequência exibem a mesma velocidade e sofrem a mesma atenuação, correspondendo a faixa mais adequada para o GPR. (ANNAN, 1996).

A TABELA 5 mostra a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica relativa de alguns dos materiais mais comuns nos estados seco e saturado.

TABELA 5: Permissividade dielétrica e condutividade elétrica de alguns materiais (secos e saturados)

Materiais secos	ϵ_r	σ (ms/m)	Materiais Saturados	ϵ_r	σ (ms/m)
Areia seca e cascalho	2-6	0,01	Granito	7	1
Argila	5	2	Silte saturado	10	1-10
Granito	5	0,01	Areia	20-30	0,1-1
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9

(FONTE: PORSANI, 1999).

Em materiais geológicos de baixa condutividade elétrica, o campo eletromagnético propaga-se com uma velocidade (v) que depende da constante dielétrica dos materiais, conforme expressa pela equação (3.25).

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

Coeficiente de reflexão

Quando uma onda se propaga através de um meio, ela é atenuada com a profundidade até encontrar uma interface, cujo contraste de impedância elétrica permite sua reflexão. Segundo Gandolfo (1999), na grande maioria das aplicações de GPR as reflexões das ondas de radar ocorrem nas interfaces de materiais com diferentes valores de permissividade dielétrica (ϵ). A constante dielétrica é dada por:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.28)$$

Onde:

K = constante dielétrica do material

ϵ_0 = permissividade dielétrica no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

ϵ = permissividade dielétrica do material.

A amplitude do coeficiente de reflexão pode ser descrita em termos da impedância elétrica (Z). E a impedância Z é definida pela relação entre o campo elétrico (\vec{E}) e o campo magnético (\vec{H}), ortogonais entre si. (BORGES, 2002).

$$Z = \frac{E}{H} \quad (3.29)$$

Em uma incidência normal, a amplitude do coeficiente de reflexão (r_{gpr}), pode ser escrita pela seguinte equação:

$$r_{gpr} = \frac{\sqrt{\epsilon'_{1}} - \sqrt{\epsilon'_{2}}}{\sqrt{\epsilon'_{1}} + \sqrt{\epsilon'_{2}}} \quad (3.30)$$

O coeficiente de reflexão entre as camadas é importante para análise da polaridade do sinal, pois as resoluções vertical e horizontal, proporcionam uma avaliação da viabilidade do GPR nas diversas aplicações.

Profundidade de penetração

Segundo Olhoeft (1984), a profundidade de penetração é condicionada pela condutividade elétrica (σ), conteúdo de água e de argila e heterogeneidade do terreno.

Em materiais com alta condutividade elétrica, δ é muito baixa. Pelo contrário, em materiais com baixa condutividade elétrica ocorre um aumento do δ , proporcionando uma maior profundidade de investigação (REYNOLDS, 2003). Parasnis (1997) mostra que a profundidade de penetração depende mais da condutividade do meio do que da frequência utilizada no levantamento. Já para Daniels (1989), a condutividade elétrica e a frequência da antena condicionam a profundidade de penetração.

Entretanto, outros fatores influenciam a profundidade de penetração, os quais estão relacionados com a perda de energia na propagação, como espalhamento geométrico, atenuação pelo terreno, partição da energia entre as interfaces e relaxação dielétrica.

Em síntese, a penetração da onda está intrinsicamente relacionada com a condutividade (σ) da subsuperfície estudada, que por sua vez influencia a atenuação da onda eletromagnética, conforme a equação (3.23), ou seja, baixas frequências se relacionam a maiores profundidades de penetração, entretanto há perda de resolução vertical.

3.3.3. Técnicas de aquisição

As técnicas de aquisição do GPR estão relacionadas aos arranjos das antenas e podem ser de três tipos: transiluminação, *common midpoint* (CMP ou sondagem de velocidade) e *common offset* (CO ou perfil de reflexão de afastamento constante).

Na transiluminação, as antenas transmissora e receptora são montadas em poços de investigação. Paralelamente ao deslocamento das antenas (transmissora e receptora) nos poços, são produzidas imagens através da energia de propagação e não por reflexão (FIGURA 19).

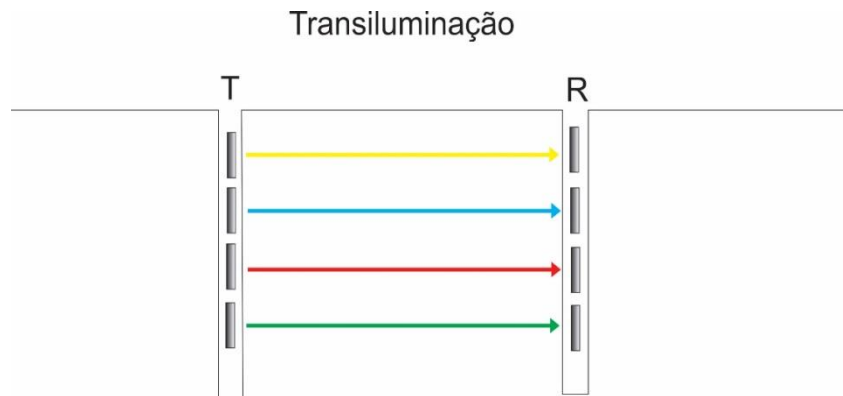


FIGURA 19: Ilustração da técnica de transiluminação (modificado de JOL, 2009). T = antena transmissora, R = antena receptora.

O *common midpoint* é utilizado para estimar a velocidade de propagação da onda de radar em função do tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade. As antenas são deslocadas em sentidos opostos de forma crescente em relação a um ponto fixo central (FIGURA 20).

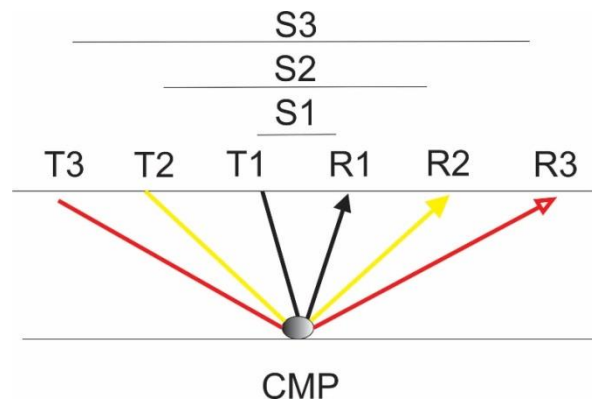


FIGURA 20: Ilustração da técnica *common midpoint* (modificado de ANNAN, 2001). T = antena transmissora, R = antena receptora. S1, S2, S3 = separação entre T e R.

No perfil de reflexão (CO), as antenas de transmissão e recepção são espaçadas de uma mesma distância (S) e são deslocadas no mesmo sentido, realizando desta forma medições em intervalos regulares (ΔX). Assim, os sinais captados são empilhados verticalmente de acordo com o tempo duplo do sinal e lateralmente em função do deslocamento das antenas (distância), mostrando assim variações das propriedades dielétricas dos objetos em subsuperfície (FIGURA 21).

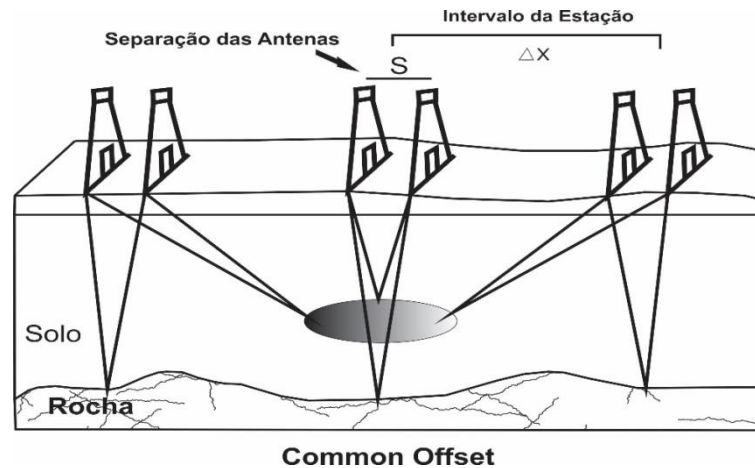


FIGURA 21: Representação da técnica *common offset* (modificado de ANNAN, 2002).

4. Área de Estudo

4.1. Localização e acesso à área de estudo

O aterro sanitário está localizado no município de Guaratuba, litoral do Estado do Paraná, o qual dista 119 km da capital Curitiba. As principais vias de acesso são a rodovia BR-376 que liga Curitiba-PR a Garuva-SC, e a BR-277 que faz conexão entre a capital paranaense e a cidade litorânea de Paranaguá (FIGURA 22).

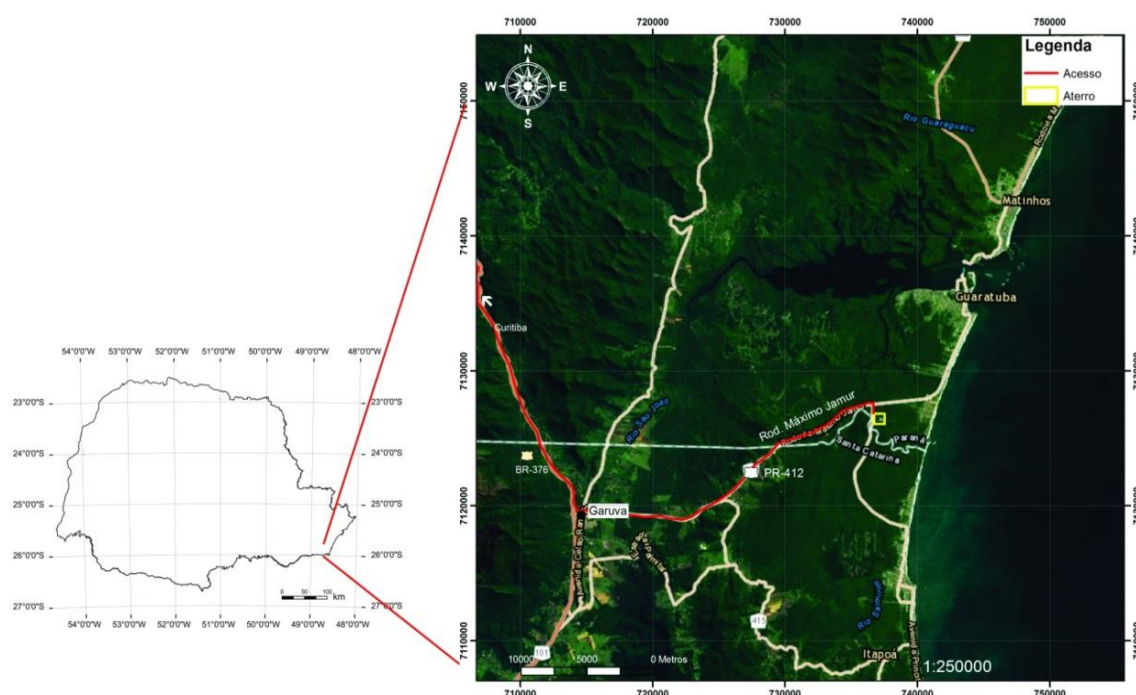


FIGURA 22: Mapa com as principais vias de acesso a área estudo.

4.2. Clima

O município de Guaratuba está compreendido entre a Serra do Mar e a Planície Litorânea. O clima, segundo a classificação de Koppen é do tipo CFa – Subtropical Úmido e Mesotérmico – com média do mês mais quente acima de 22° C e do mês mais frio inferior a 18° C. Já na Serra do Mar, em decorrência das grandes altitudes, de até 700m, o clima passa para o tipo Cfb - Subtropical Úmido e Mesotérmico com verão fresco, cuja temperatura do mês mais quente não ultrapassa os 22° C. A FIGURA 23 indica a distribuição destes dois climas no Estado do Paraná.



FIGURA 23: Distribuição dos climas Cfa e Cfb no Estado do Paraná conforme a classificação de Köppen (IAPAR, 1998).

Segundo Vanhoni (2008), dezembro, janeiro e fevereiro (verão) são os meses mais quentes no litoral do Paraná, sendo fevereiro o mais quente. Estes meses registram a maior pluviosidade, com destaque para o mês de janeiro. As temperaturas mais baixas ocorrem no inverno, nos meses de junho, julho e agosto, com a menor média no mês de julho. As baixas temperaturas são influenciadas por fatores climáticos ligados à Frente Polar Atlântica (FPa) e à Massa Polar Atlântica (Mpa).

4.3. Geomorfologia e Geologia

A definição geomorfológica da área de estudo foi baseada no Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná, na escala 1:500.000 elaborado pela empresa Minerais do Paraná S.A. – Mineropar (2006). A caracterização geológica foi baseada no Relatório Final de Pesquisa (DNPM processo 826.121/92).

4.3.1. Geomorfologia

A área de estudo é caracterizada pelas unidades morfoestruturais denominadas Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacia Sedimentar Cenozoica. A primeira inclui a unidade morfoescultural Serra do Mar, que por sua vez envolve às subunidades Morros Isolados Costeiros, Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas. Já a Bacia Sedimentar Cenozoica tem como unidade morfoescultural a Planície, que por sua vez está subdividida em planície litorânea e planícies flúvio-marinhas e fluviais (MINEROPAR 2006), conforme a FIGURA 24.

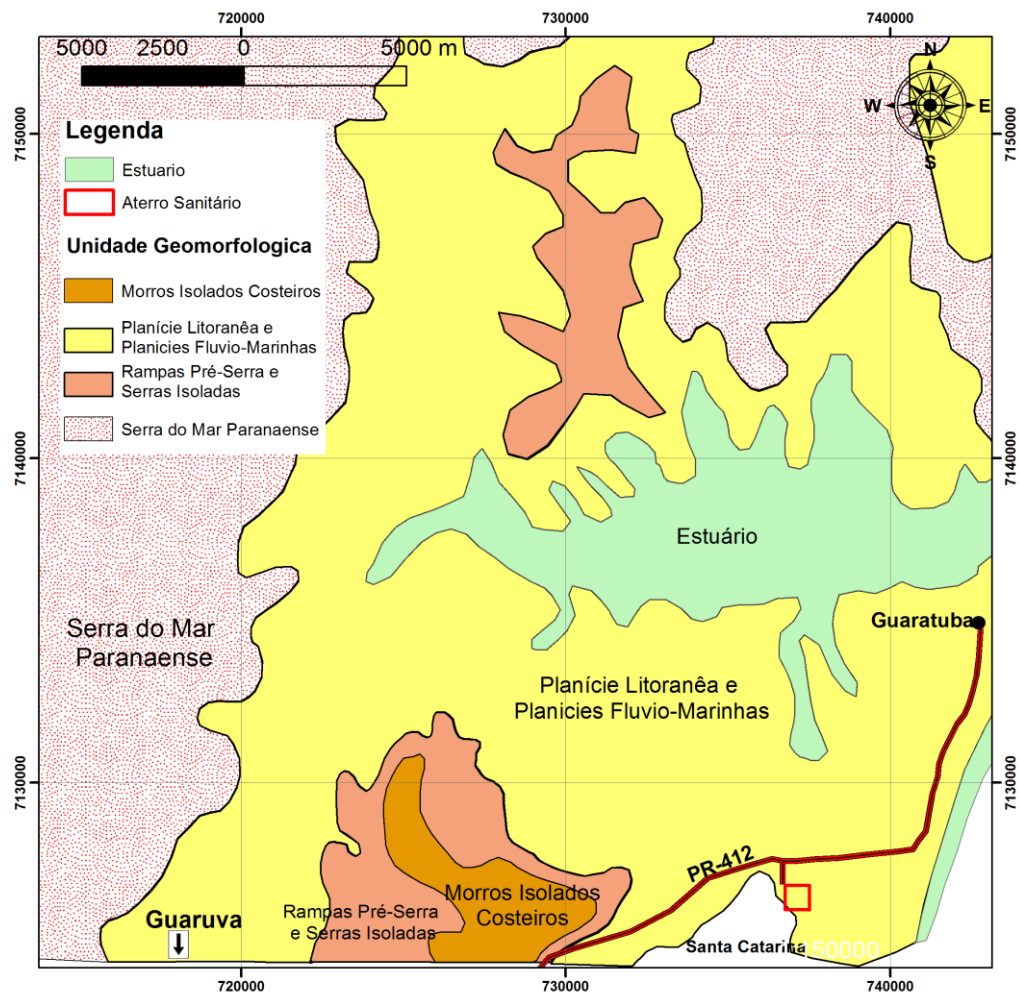


FIGURA 24: Mapa geomorfológico da área de estudo (MINEROPAR, 2006).

As unidades geomorfológicas exibidas na FIGURA 24 são observadas no quadro 1, que descreve de forma simplificada apenas as unidades e subunidades situadas na área de estudo e em seu entorno.

Unidade Morfoestrutural	Unidade Morfoescultural	Sub-unidade Morfoescultural	Formas de Relevo Morfologia
Cinturão Orogênico do Atlântico	Serra do Mar	Morros isolados costeiros	Dissecação: muito alta; Topos: alongados e em crista; Vales: em V fechados; Vertentes: Retilíneas;
		Rampas e Pré-Serras Isoladas	Dissecação: alta; Topos: alongados, em crista e rampas dissecadas; Vales: em V fechados; Vertentes: Retilíneas;
Bacias sedimentares Cenozoicas	Planícies	Planície litorânea e Planícies Fluvio-Marinha	Dissecação: baixa; Topos: ausente; Vales: ausente; Vertentes: ausente;

QUADRO 1: Unidades Morfoesculturais e Morfoestruturais da área de estudo (MINEROPAR, 2006).

4.3.2. Geologia

A geologia da área de estudo e do seu entorno compreende duas unidades geológicas distintas denominadas (i) Depósitos Arenosos Marinhos da planície litorânea, com idade Terciária-Quaternária, e (ii) Complexo Gnáissico-Migmatítico Costeiro, (FIGURA 25).

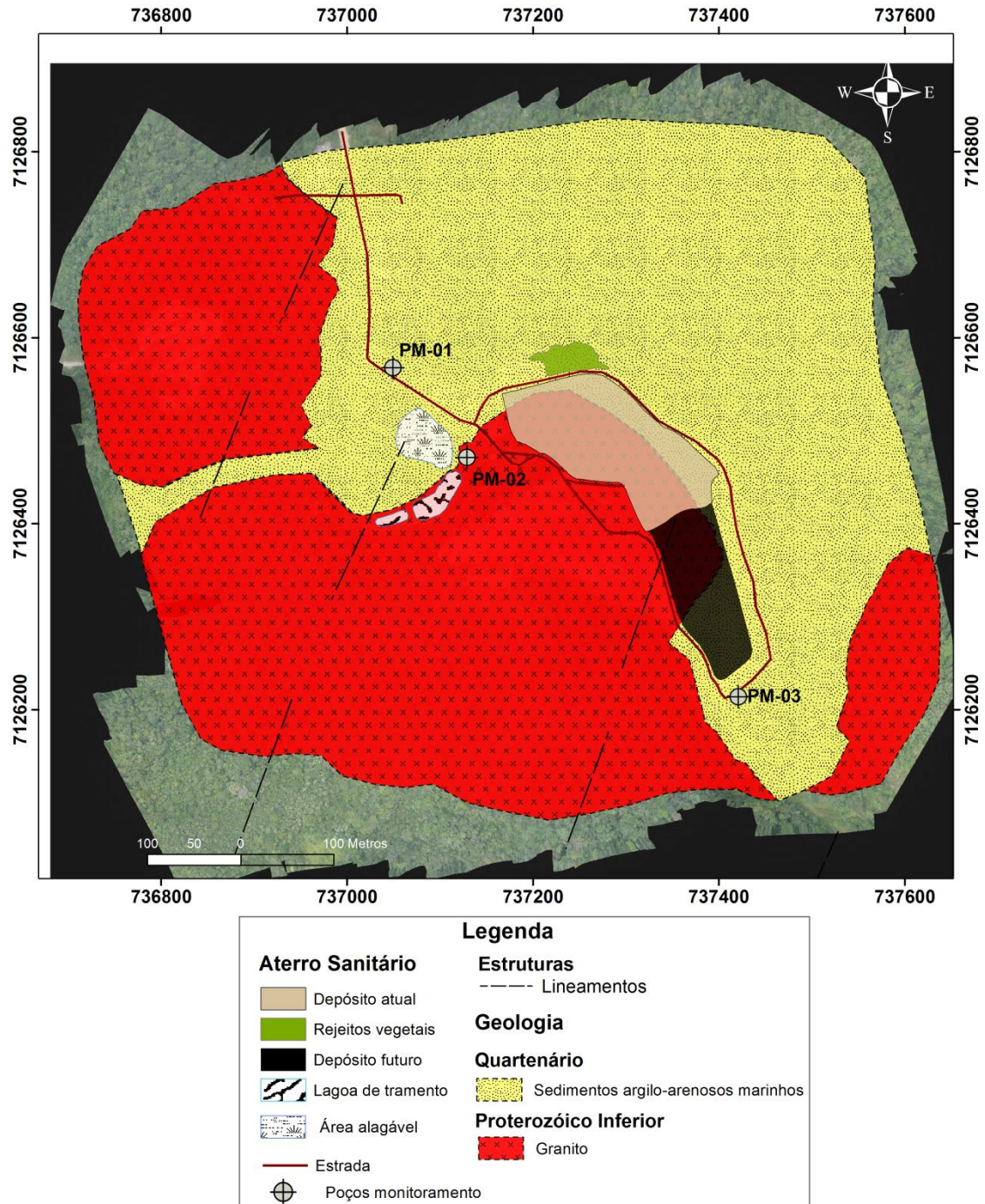


FIGURA 25: Mapa geológico simplificado da área de estudo (modificado GÓIS, 1999).

As porções mais planas são compreendidas pelos terraços marinhos subatuais associados aos cordões litorâneos e paleodunas, localizados mais afastados da linha de praia. São formados por areias quartzosas, com boa seleção e grau de retrabalhamento, com continuidade lateral.

Apresentam um nível superficial, que pode localmente atingir até 2,0 m de espessura formado por areia fina com restos vegetais e alguma matéria orgânica

decomposta, conferindo ao sedimento coloração marrom a cinza clara. Góis (1994) apresenta os resultados de duas sondagens a trado, L800-50S e L1400-100N, realizadas na planície costeira, caracterizadas de cima para baixo, por material arenoso acinzentado a cinza, granulometria fina a média, bem selecionado e arredondado, além de camada argilosa branca com cerca de 1 m de espessura, seguido de areia branca, fina a média. Também foi descrito um material arenoso com presença de caulim e grãos de feldspato, o que revela, provavelmente, influência coluvionar originada da rocha granítica.

Ainda segundo Góis (1994), os solos residuais são compostos por um conjunto de horizontes (A+B) com coloração que varia de marrom a vermelho. O horizonte B é predominantemente areno-argiloso e, em determinados locais, areno-siltico-argiloso, cuja espessura varia de 2 a 2,5 m e, às vezes, tendem a desaparecer em porções íngremes. Já o horizonte C exibe uma coloração entre castanho escuro e vermelho, e uma composição areno-siltico-argilosa.

As rochas mais antigas são os granitos proterozóicos. Geralmente são leucocráticos, com textura entre equigranular a inequigranular. Mineralogicamente são compostos por microclínio, quartzo, oligoclásio/andesina, biotita, hornblenda, epidoto, opacos, sericita, carbonatos e minerais secundários. Uma foliação incipiente é visível macro e microscopicamente, além de apresentar um pequeno grau de metamorfismo e deformação interpretados em lâminas delgadas (GÓIS, 1994).

A esfoliação esferoidal é a alteração intempérica predominante, ocasionando a formação de blocos de tamanhos variados envolvidos por solos residuais. Em anexo, encontra-se um mapa com a localização e descrição das sondagens.

4.4. Modelo digital de elevação (MDE)

Na área adjacente ao aterro sanitário, as porções Oeste e Sudoeste compreendem as maiores altitudes, que variam entre 25 a aproximadamente 80 m, constituindo os relevos de colinas e morros. Segundo Góis (1994), a espessura do material de capeamento é bastante irregular, podendo variar de zero nos tratos de maior declividade, até cerca de 15 m na planície.

Nas porções Norte e Leste do aterro sanitário, as altitudes são inferiores a 20 m, que correspondem à planície costeira que circunda os granitos (FIGURAS 26 e 27).

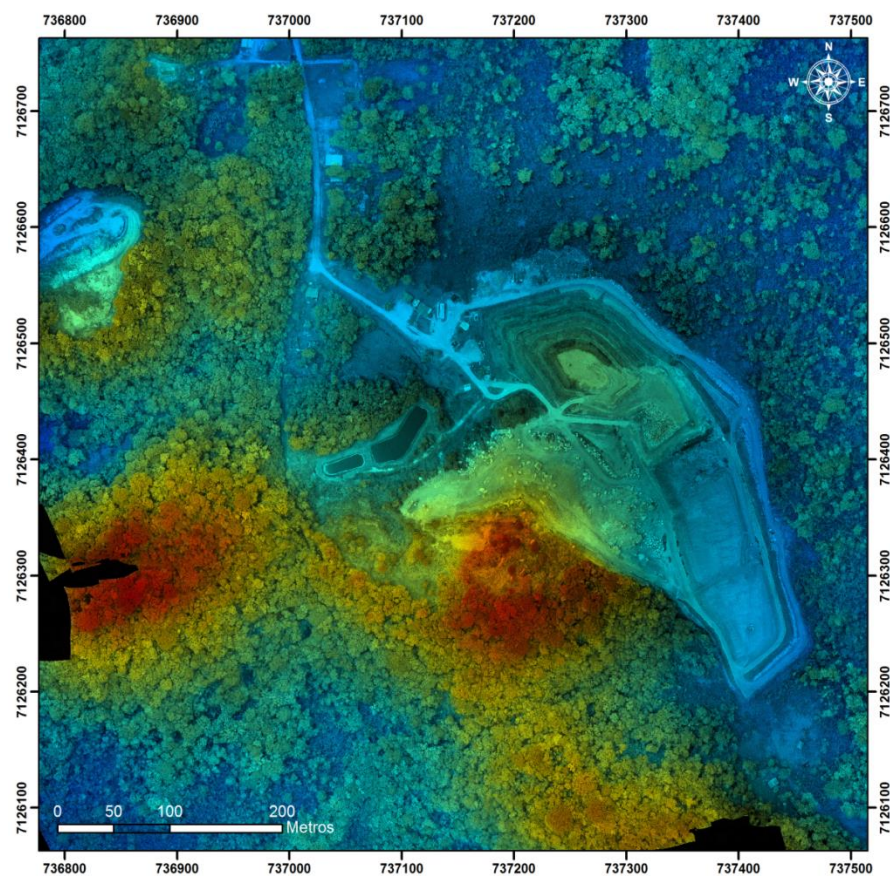


FIGURA 26: Imagem do aterro sanitário sobreposta ao MDE (DNPM, 2013).

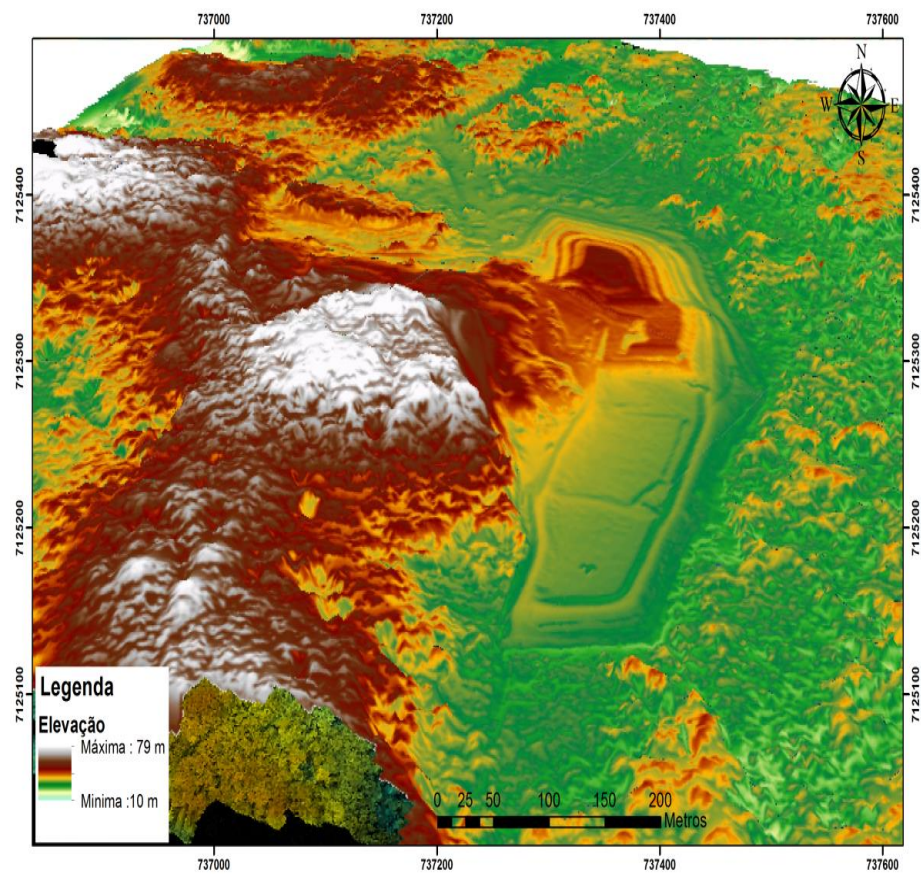


FIGURA 27: Modelo digital de elevação (MDE) da área pesquisada.

A FIGURA 28 mostra o mapa de escoamento superficial do aterro sanitário. A preferência do fluxo é indicada por um sistema de setas, as quais são originadas a partir das intersecções dos pixels que compõem o MDT.

Essas setas são caracterizadas por dois parâmetros, direção e magnitude. A direção indica o deslocamento do fluxo das cotas elevadas para as baixas, enquanto o comprimento indica a magnitude da inclinação da encosta.

Conforme a FIGURA 28, na área do depósito atual os sentidos predominantes são para Norte e Leste. No depósito futuro o fluxo superficial é de Oeste para Leste.

Em relação à magnitude, em função das encostas pouco íngremes, não há distinção no comprimento das setas de fluxo.

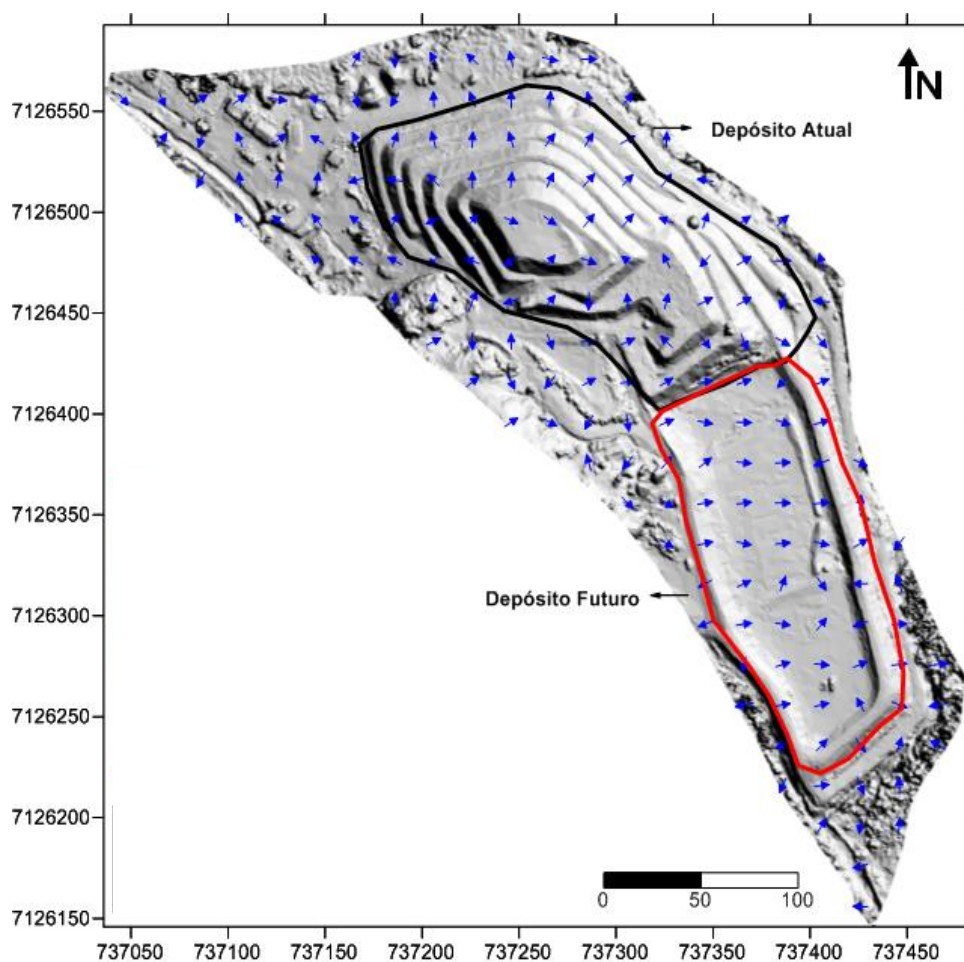


FIGURA 28: Mapa de escoamento superficial.

4.5. Característica do chorume no aterro sanitário de Guaratuba

Preussler (2008) realizou, entre maio de 2007 e abril de 2008, coletas mensais do chorume em seis pontos distintos (FIGURA 29), objetivando avaliar a eficiência do tratamento do chorume pela sequência convencional.

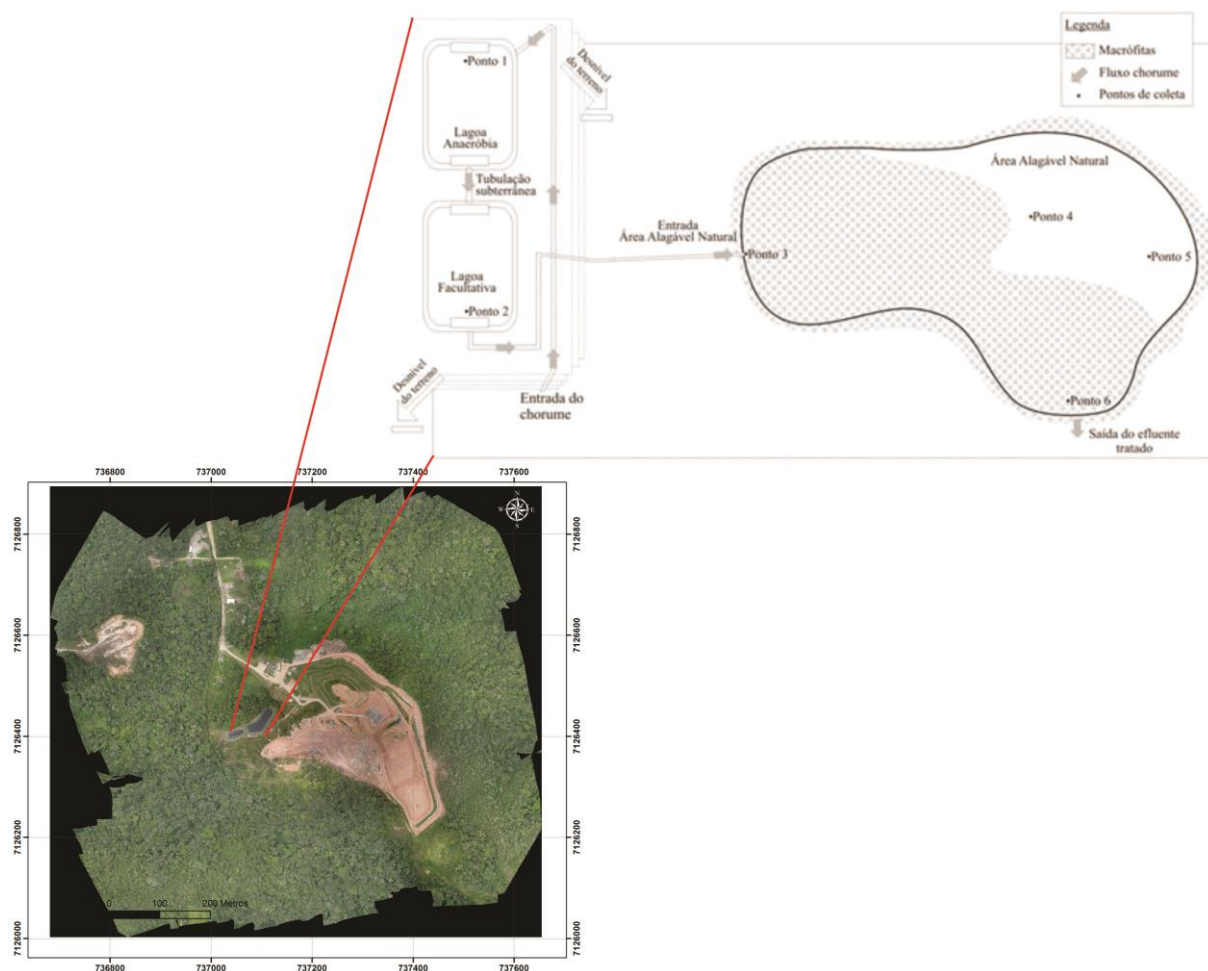


FIGURA 29: Ilustração dos pontos de coletas das amostras de chorume (modificado Preussler, 2008).

A TABELA 6 mostra as características do chorume pesquisado no período. A autora observou que o chorume manteve-se na faixa de pH neutro a alcalino caracterizando o chorume como antigo.

Variações nos valores de condutividade elétrica, em pontos e meses distintos podem ser explicadas pela profundidade da coleta. A profundidade da coleta pode influenciar os resultados da condutividade, pois nas proximidades dos sedimentos da área alagável se intensificam os processos de decomposição e redução da matéria orgânica, o que contribui para o aumento da disponibilidade de íons na coluna d' água.

TABELA 6: Parâmetros da amostra de chorume do ponto 1 (FIGURA 29).

Parâmetros	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
pH	8,10	7,53	8,90	0,40
Oxigênio dissolvido (mg/L)	0,42	0,10	1,37	0,35
Condutividade elétrica (mS/cm)	10,05	3,17	17,71	5,29
Sólidos Totais (mg/L)	12037,17	5005,00	32036,00	8969,56
Sólidos Totais voláteis (mg/L)	6633,17	1319,00	27239,00	8997,08
DBO (mg/L)	541,39	172,00	940,00	266,66
DQO (mg/L)	3064,28	1029,60	8712,00	2306,44
DBO/DQO	0,22	0,06	0,40	0,13
Nitrogênio Amoniacal (mg.L)	1734,45	700,00	7774,67	2071,97
Fosfato (mg/L)	1819,22	746,67	7812,00	2054,54
Zinco (mg/L)	0,71	0,03	1,54	0,49

(FONTE: PREUSSLER, 2008)

5. Equipamentos e *software*

Os *software* utilizados para o processamentos dos dados elétricos de resistividade e polarização induzida foram o *Oasis MontajTM* e o *Zonge 2D Inversion for InteractiveTM IP*, ambos da *Geosoft/Interpex*, e para os dados de GPR foi usado o *ReflexW* da *Sandmeier Scientific*. Já a digitalização e elaboração dos mapas de localização, geológico, geomorfológico e das demais figuras foram realizadas nos programas *ArcGIS®* e *Corel Draw®*.

5.1. Sistema Veicular Aéreo não Tripulado

Uma tecnologia que está em desenvolvimento na perícia, nos serviços públicos e privados é o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), ou *Unmanned Aerial Vehicles (UAVS)* popularmente conhecido como drone. Diversas são as áreas de aplicação dos VANTs, como mineração, agricultura, perícias, entre outras, sendo necessário, entretanto, o Certificado de Autenticação de Voo Experimental (CAVE), expedido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) como os obtidos, por exemplo, pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Departamento de Polícia Federal (PF), e outros órgãos militares.

O projeto intitulado uVANT é uma parceria firmada entre o DNPM e a Universidade de Brasília (UnB) e contempla o desenvolvimento e uso de VANTs na fiscalização de atividades minerárias. Segundo Bicho (2013), a utilização de VANT numa plataforma de sensoriamento remoto possibilita a aquisição de dados com alta resolução espacial e temporal, a um custo baixo de operação e manutenção. No dia 11 de novembro de 2013 a equipe VANT do DNPM realizou um sobrevoo na área do aterro sanitário de Guaratuba, em decorrência de possível lavra irregular.

A aeronave utilizada para obtenção das imagens tem uma envergadura de 1,90 m, peso de 2,5 kg, motor elétrico *brushless* e baterias com capacidade de 5.000 mA/h, câmera de vídeo para transmissão frontal e câmera para registro fotográfico, bem como autonomia de voo de 90 minutos e alcance de 4 km a partir da base, (FIGURAs 30 A e B)

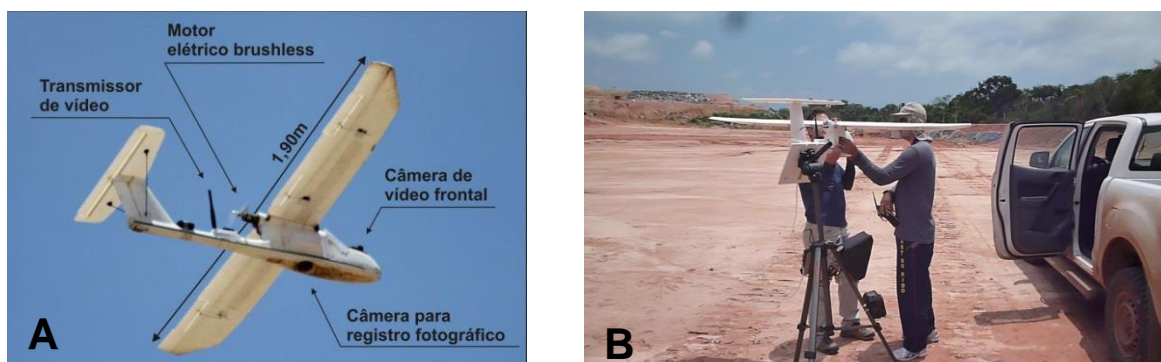


FIGURA 30: A) Foto do equipamento uVANT; B) Foto evidenciando o levantamento no aterro sanitário de Guaratuba.

A imagem de alta resolução (4x4 cm), assim obtida, é mostrada na FIGURA 31 e foi cedida pela coordenadora do Projeto uVANT, Cristina Prando Bicho (DNPM), que auxiliou no planejamento e no processamento dos mapas.

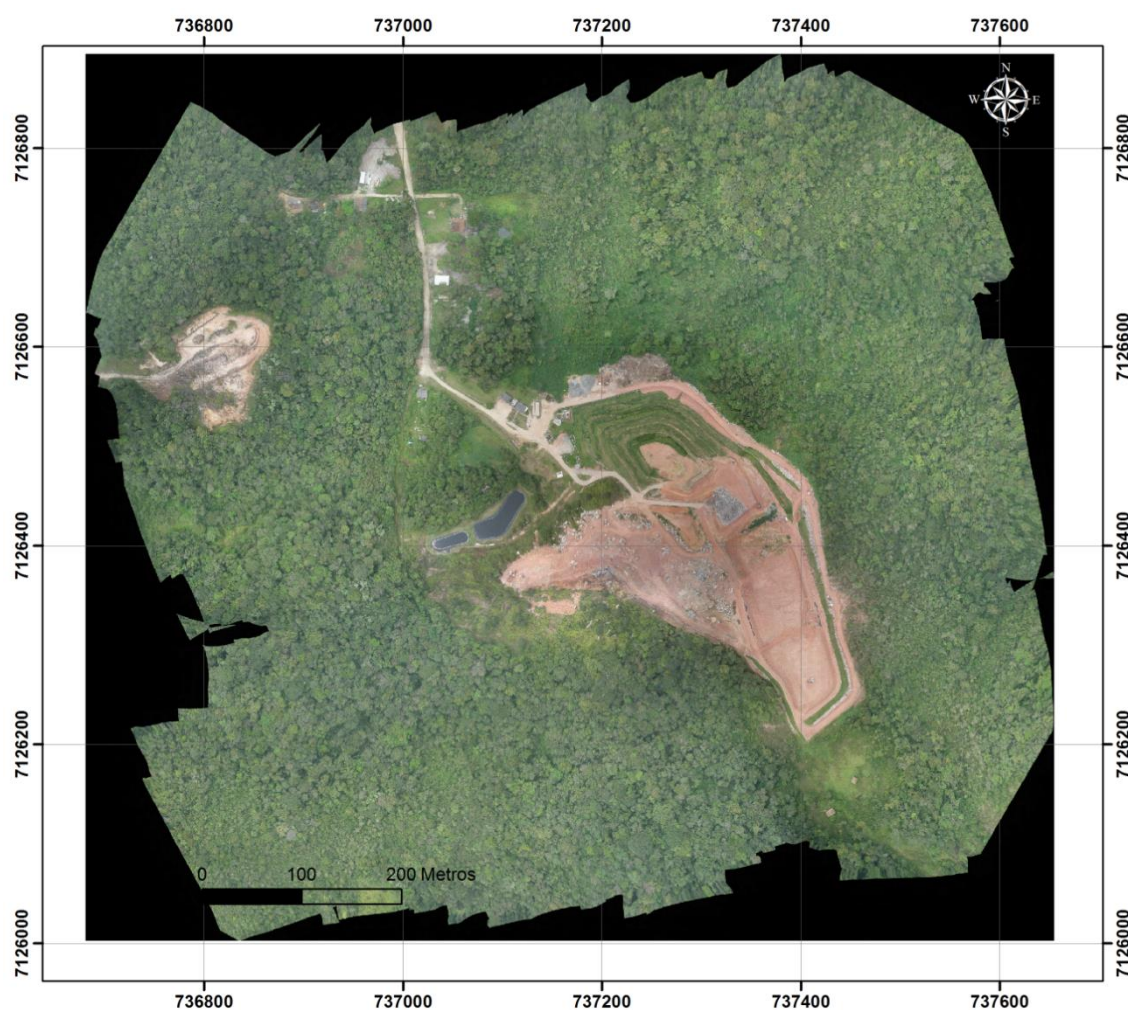


FIGURA 31: Imagem aérea do aterro sanitário de Guaratuba-PR captada pelo VANT (DNPM, 2013).

5.2. Eletrorresistividade/IP

Nas aquisições de dados ER e IP usou-se o sistema de recepção multicanal (ELREC PRO), com o transmissor VIP 3000, pertencente ao LPGA/UFPR (FIGURA 32 A e B). Em campo usaram-se eletrodos não polarizáveis (com solução de sulfato de cobre) nos eletrodos de potencial, e eletrodos metálicos para injeção de corrente (FIGURA 32 C e D). Durante a coleta dos dados utilizou-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 20 m, investigando-se seis níveis de profundidade.



FIGURA 32: Fotos dos equipamentos de eletrorresistividade/IP. A) Sistema Transmissor VIP3000 e B) Sistema receptor multicanal; (C) Bobina e eletrodo de corrente e (D) Eletrodo de potencial.

A aquisição dos dados geoeletricos foi realizada em uma única etapa de campo, entre 12 e 17 de dezembro de 2013. Foram levantadas cinco linhas, denominadas L1 (360 m), L2 (520 m), L3 (400 m), L4 (340 m) e L5 (180 m),

totalizando 1.800 metros, conforme a FIGURA 33, dispostas em áreas internas e externas ao depósito.

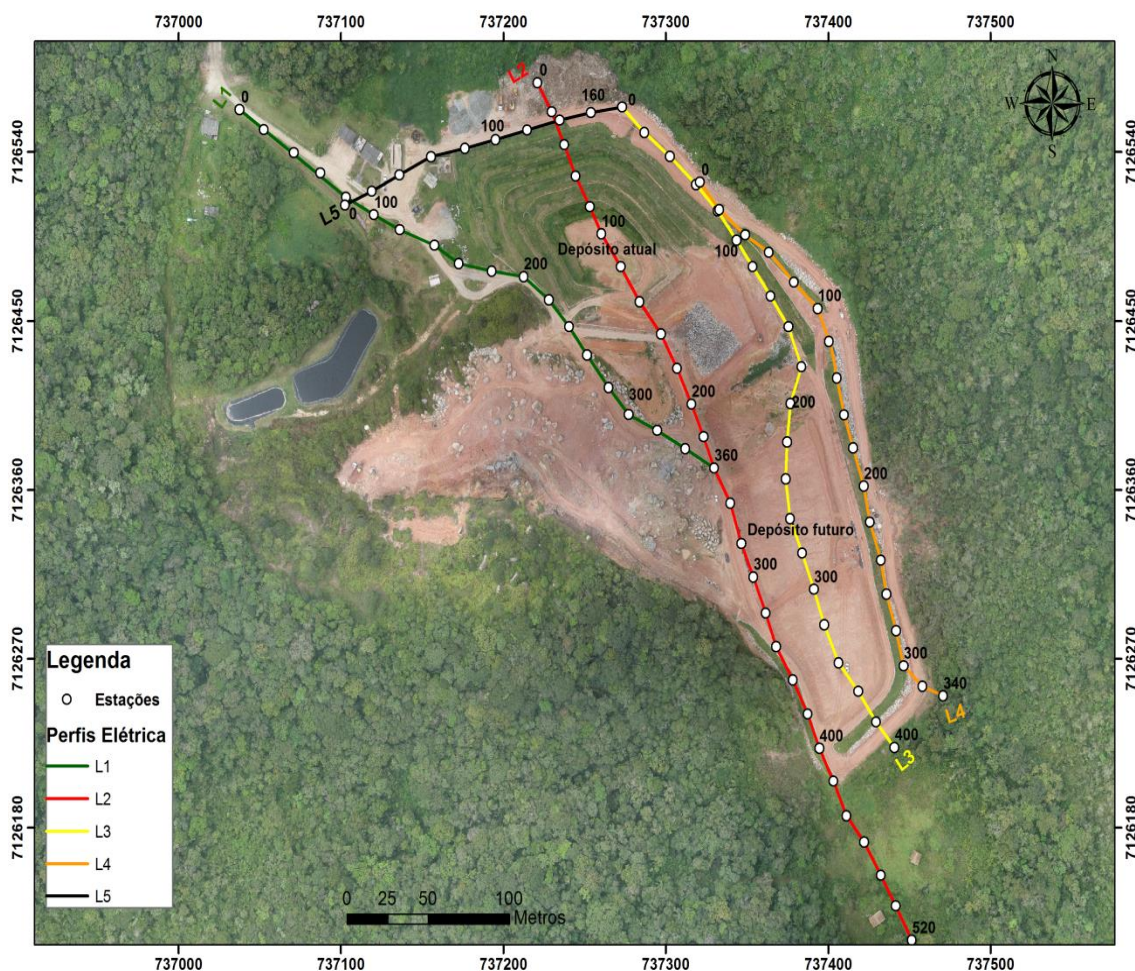


FIGURA 33: Mapa com a localização das linhas de caminhamento elétrico.

A Linha L1, FIGURA 34, foi perfilada fora do aterro e teve como objetivo, determinar o *background* da área de estudo, além de verificar a eventual influência da área alagável pós-tratamento na porção inicial do perfil, entre as estações 60 a 120m, conforme FIGURA 33.



FIGURA 34: Foto possibilita uma visão panorâmica da Linha L1 de ER/IP.

A Linha L2 (FIGURA 33), foi realizada com o intuito de diagnosticar a base do depósito, verificar seu confinamento e determinar o *background* da porção Sul (FIGURA 35).



FIGURA 35: Foto evidencia a aquisição de dados de ER/IP ao longo da Linha L2.

A Linha L3 foi executada na borda Leste e adentrou a futura área do depósito, FIGURA 33, com o objetivo de diagnosticar uma possível migração do percolado e tentar identificar uma camada de resíduo sólido do antigo lixão, sotoposta a manta de impermeabilização (Figura 36)

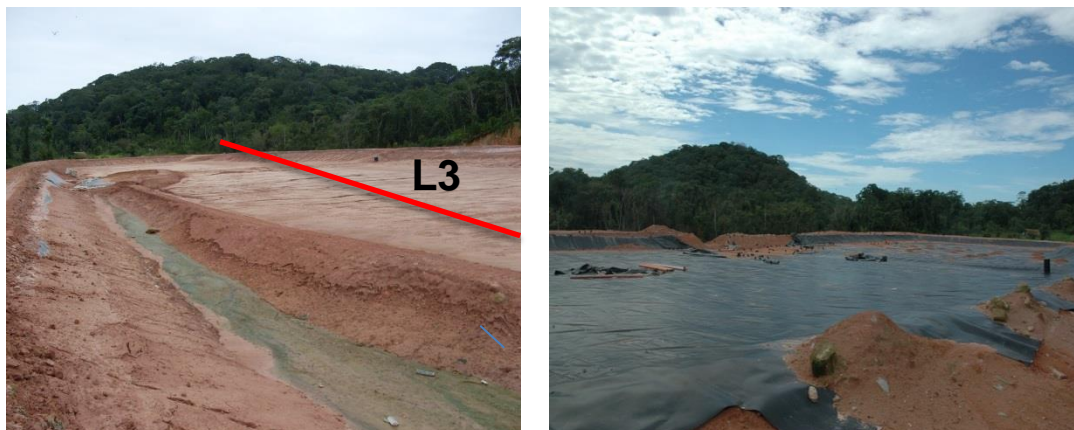


FIGURA 36: Fotos de localização da Linha L3 (esquerda) e da manta impermeabilização sotoposta ao antigo lixão (direita). Fotos cedidas pelo Departamento de Polícia Federal-PR.

O caminhamento elétrico da Linha L4 (FIGURA 33) foi executado também na porção Leste da área, tendo em vista que na visita realizada no dia 5 de agosto de 2013 foi constatada a migração do chorume do antigo lixão para um trato contíguo ao aterro futuro. Já a Linha L5 foi realizada para identificar resultados geoeletricos adjacente ao aterro sanitário, conforme a FIGURA 33.

No final de dezembro de 2014 foi executada a última etapa de campo, na qual foi realizada uma sondagem elétrica vertical (150 m). A SEV teve como finalidade determinar a espessura do depósito e caracterizar a resposta do percolado com os resíduos. Este ensaio geofísico teve uma abertura máxima ($AB/2$) de 150 m, em função de acessibilidade da área de estudo (FIGURA 37).



FIGURA 37: Mapa com a localização da SEV.

5.3. Ground Penetrating Radar (GPR)

O equipamento utilizado para aquisição dos dados de GPR foi fabricado pela empresa italiana *Ingeneria Dei Sistemi* (IDS), denominado Detector Duo, de propriedade do Setor Técnico-Científico da Polícia Federal do Paraná - SETEC.

O equipamento é composto por uma Unidade de Armazenamento (*notebook*) que serve para armazenar os dados de campo, uma Unidade de Controle do sinal do radar (DAD) que faz a comunicação com as antenas e o sensor odométrico. O sensor odométrico está conectado a uma das rodas do sistema, e é utilizado para registrar os traços contínuos. O sistema inclui um conjunto de antenas blindadas, com dupla frequência (250MHz e 700MHz) possibilitando a aquisição simultânea dos dados.

O levantamento GPR foi executado em duas etapas: uma no dia 19 de agosto de 2013 e outra no dia 14 de fevereiro de 2014, (FIGURA 38 A e B).



FIGURA 38: As fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR sobre o depósito futuro (A) e adjacente ao depósito atual (B).

O primeiro levantamento de GPR foi feito no mesmo dia do levantamento com o VANT, identificado pelo código GPR3A (27 m) e teve o intuito de tentar verificar a presença de resíduo sólido do antigo lixão (sotoposto ao depósito futuro). Já o perfil GPR6 (27,65 m) serviu de base para tentar caracterizar os refletores de resíduos sólidos e/ou o percolado.

Na segunda etapa foram realizados cinco perfis, denominados GPR 1 (223 m), GPR2 (166,32 m), GPR3 (150,67 m), GPR4 (69,57 m) e GPR5 (27,65 m), totalizando aproximadamente 772 m de perfis (FIGURA 39). Em geral os perfis de GPR são de pequenas extensões, em decorrência da presença de fragmentos rochosos (FIGURA 38 B).



Figura 39: Mapa com a localização dos perfis de GPR.

5.4. EM34-3

O equipamento EM34-3, fabricado pela Geonics (Canadá), de propriedade da CPRM- Serviço Geológico do Brasil, composto por duas bobinas, uma transmissora e outra receptora, além de dois módulos, um de controle que emite a campo eletromagnético e outro módulo de leitura, além de cabos que as conectam com comprimentos de 10 m, 20 m e 40 m. A FIGURA 40 ilustra a bobina de receptora e o módulo de leitura.



FIGURA 40: Foto registra a bobina receptora e o modulo de recepção do equipamento EM34-3 usados no aterro sanitário de Guaratuba.

O levantamento foi realizado no dia 11 de novembro de 2014, resultando em 6 perfis (EM34-3A- 1070 m; EM34-3B – 50 m; EM34-3C – 90 m; E34-3D – 60m, EM34-3E – 130 m e EM34-3F – 120 m), totalizando 1.520 m de perfilagem, como se observa na FIGURA 41. As leituras foram realizadas no modo dipolo vertical, amostragem de 10 m, com cabo de referência de 20 m. Contudo, no aterro futuro, o cabo de referência de 40 m foi empregado no perfil EM34-3F (FIGURA 41).

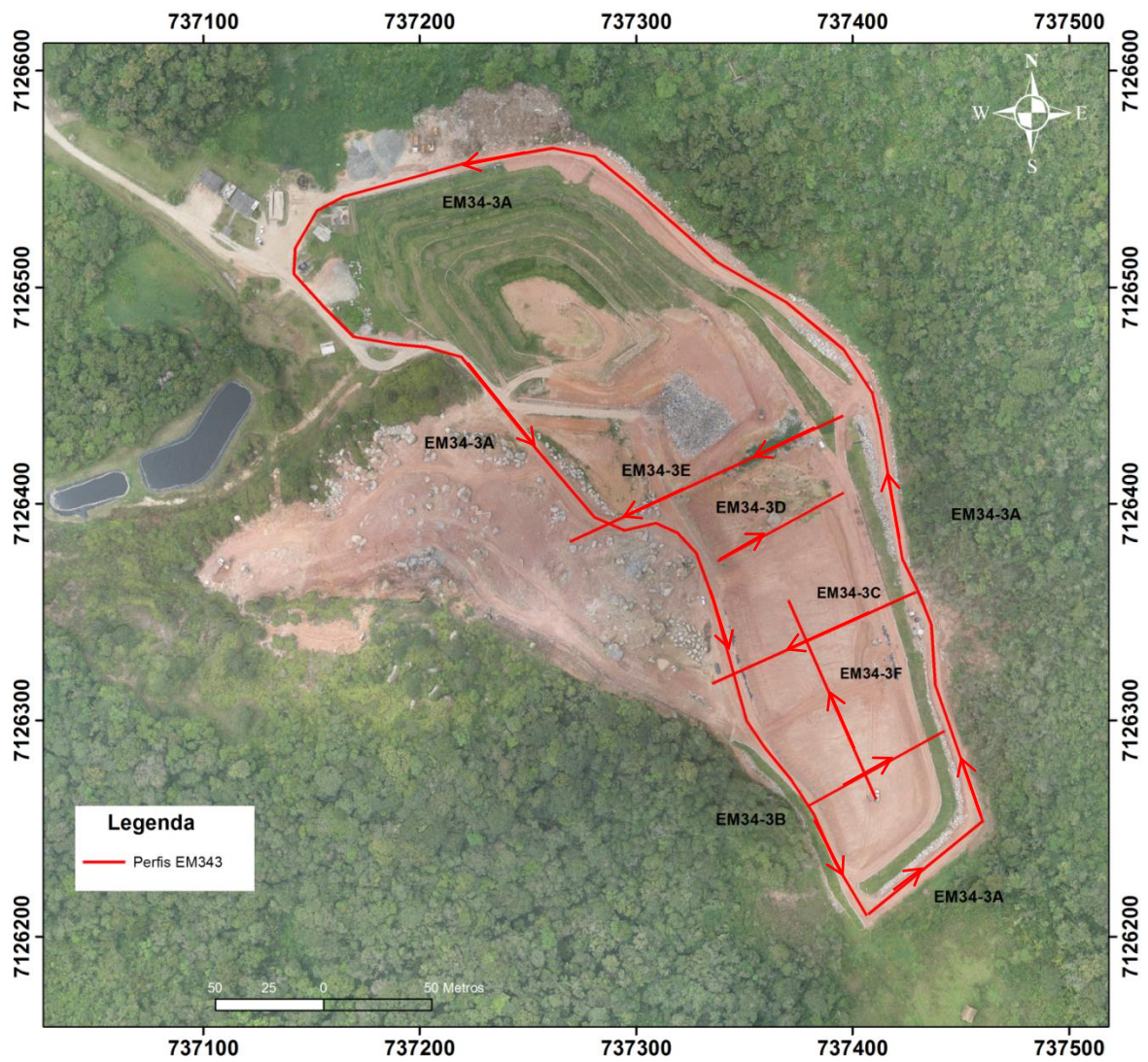


FIGURA 41: Mapa com a localização dos perfis eletromagnéticos realizados com o EM34-3.

6. Resultados e discussões

6.1. Análise de poços de monitoramento

Apenas as análises das águas dos poços de monitoramento 2 e 3 (PM2 e PM3), FIGURA 25, coletadas no final de 2013 a uma profundidade de 3 m, foram cedidas pelo Sr.Elcio da Veiga (Gerente do aterro sanitário), cujos resultados são apresentados na TABELA 7.

TABELA 7: Resultados das análises dos poços de monitoramento 2 e 3.

Análises	PM2	PM3	CONAMA 396/2008	Portaria n. 2914/2011
Óleos e Graxas Totais	<10mg/L	<10mg/L	X	X
DBO5	23,7mg/L	45,8 mg/L	X	X
DQO	67mg/L	101 mg/L	X	X
pH	6,78	6,5	X	X
Cadmio	7 µg/L; 0,007mg/L	28,31 µg/L; 0,02831 mg/L	5 µg/L	0,005 mg/L
Chumbo	19,17 µg/L; 0,019 mg/L	116,300 µg/L; 0,1163 mg/L	10 µg/L	0,01 mg/L
Mercúrio	<LD µg/L	<LD µg/L	1 µg/L	0,001 mg/L
Zinco	58,4 µg/L	309,600 µg/L	5.000 µg/L	5 mg/L

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2000), valores de DQO>10 mg/l e DBO₅ <1 mg/L, como listados na TABELA 7 são indicativos de contaminação, apesar da legislação brasileira não especificar limites para tais parâmetros.

Quanto aos metais, os valores de Pb e Cd estão acima dos máximos permitidos pela resolução CONAMA 396/2008, para água subterrânea, e pela Portaria MS n. 2914/2011 do Ministério da Saúde, para água potável. As análises de Hg estão abaixo do limite de detecção do método e o Zn mostra padrões normais.

6.2. Métodos Elétricos

6.2.1. Sondagem elétrica vertical (SEV)

Os resultados obtidos pela SEV, FIGURA 42, onde no painel superior se observam os dados adquiridos em campo (pontos pretos) e a curva gerada em vermelho simboliza o melhor ajuste calculado com base no modelo do painel inferior. Assim, foram caracterizadas três camadas distintas: a primeira, com 1,5 m de espessura e resistividade de 35,5 $\Omega.m$ e foi interpretada como resposta de material superficial com composição areno-siltico-argiloso; a segunda, com 30 m de espessura e resistividade de 16,4 $\Omega.m$, refletiu o chorume e resíduos sólidos do aterro; e a terceira, com resistividade muito elevada (3243 $\Omega.m$) foi interpretada como a geomembrana que recobre o antigo lixão. As respostas geoeletricas são condizentes com as informações fornecidas *in loco* pelo gerente Sr. Elcio da Veiga.

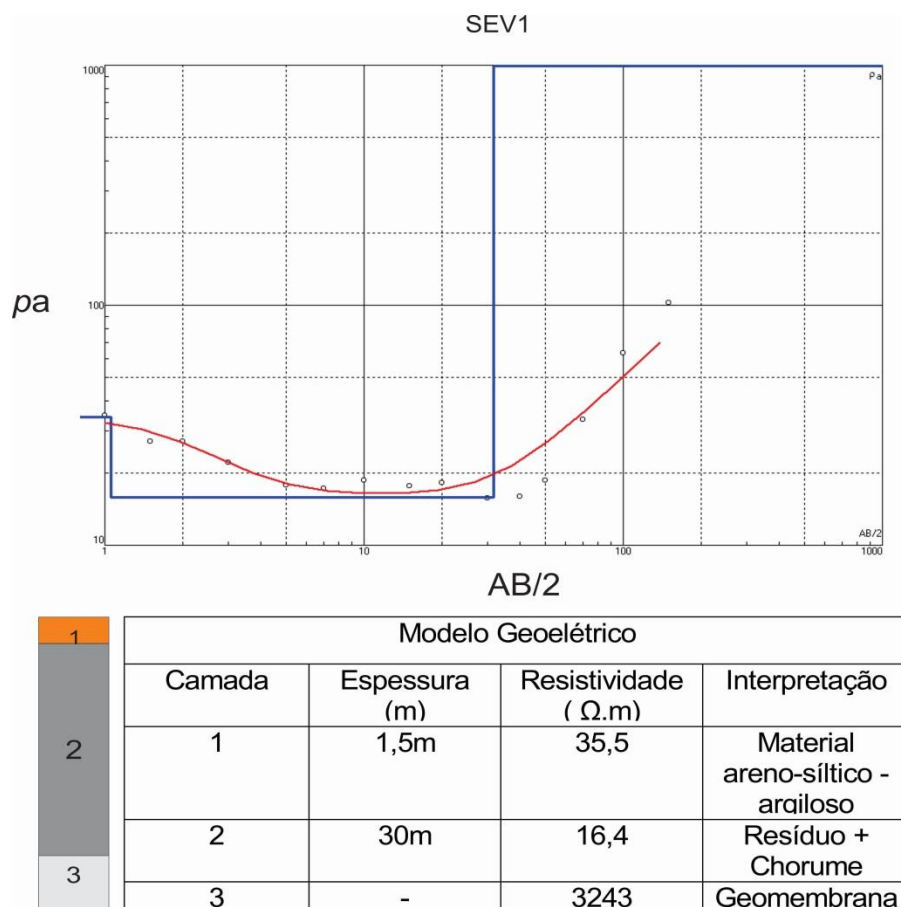


FIGURA 42: A) Curva de resistividade aparente com o modelo ajustado e B) Modelo geoeletrico elaborado pela SEV1.

6.2.2. Caminhamento elétrico (CE- arranjo dipolo-dipolo)

Os dados de campo foram representados na forma de pseudoseções de resistividade e cargabilidade, do que decorreram seus respectivos modelos de profundidade obtidos por inversão, além dos mapas de níveis de profundidade.

Os resultados são apresentados nesta ordem, entretanto, só os modelos de profundidade foram interpretados, os quais permitiram delinear o *background* e as áreas afetadas pelo contaminante. Valores espúrios (discrepantes ou negativos) identificados em algumas pseudoseções de resistividade e cargabilidade não foram incorporados ao processo de geração dos modelos de profundidade (inversão).

As FIGURAS 43 e 44 mostram, respectivamente, as pseudoseções e os modelos de profundidade da resistividade e da cargabilidade da Linha 1, e possui direção NW-SE com extensão de 360 m. Os resultados dos modelos (FIGURA 44) apresentam uma variação de resistividade entre 7 e 3000 $\Omega.m$ e de cargabilidade de 0,3 e 65,0 mV/V. Nestes modelos, baixas resistividades ($<50 \Omega.m$) e cargabilidades (<10 mV/V) foram associadas ao percolado, identificadas, respectivamente, entre as estações 180-280 m e 260-280 m. No modelo da resistividade (painel superior da FIGURA 46), valores intermediários e elevados foram associados, respectivamente, aos sedimentos e aos granitos.

Conforme se observa no painel inferior da FIGURA 44, os baixos valores de cargabilidade, entre as estações 260 e 280 m, só em parte coincidem com índices baixos de resistividade, o que reflete o chorume condutivo e não polarizável. Entretanto, entre as estações 160 e 240 m se nota a correspondência entre baixos valores de resistividade e elevados de cargabilidade, o que pode ser explicado pela presença de material polarizável no contexto do lixão, o que foi observado *in loco*.

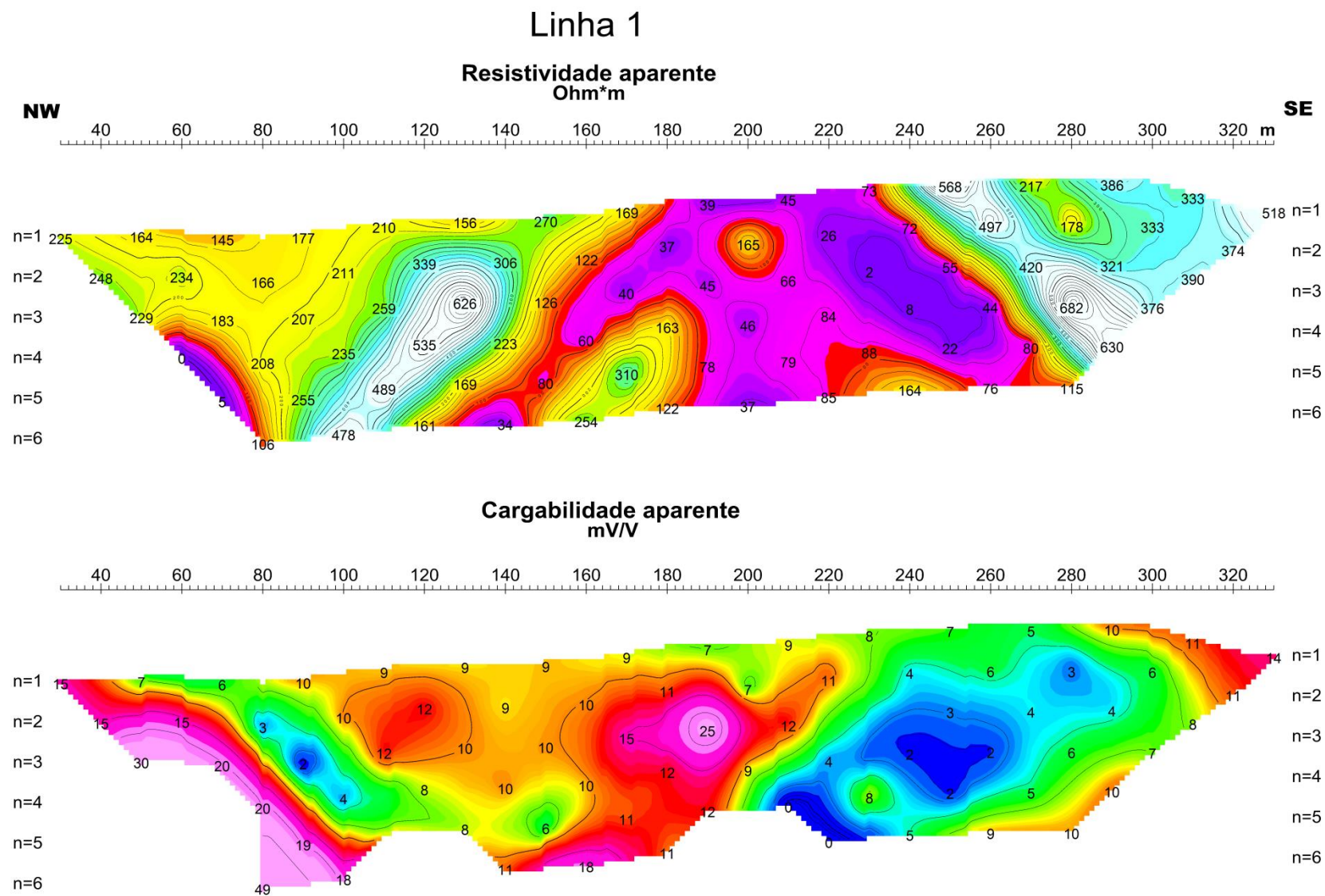


FIGURA 43: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior).

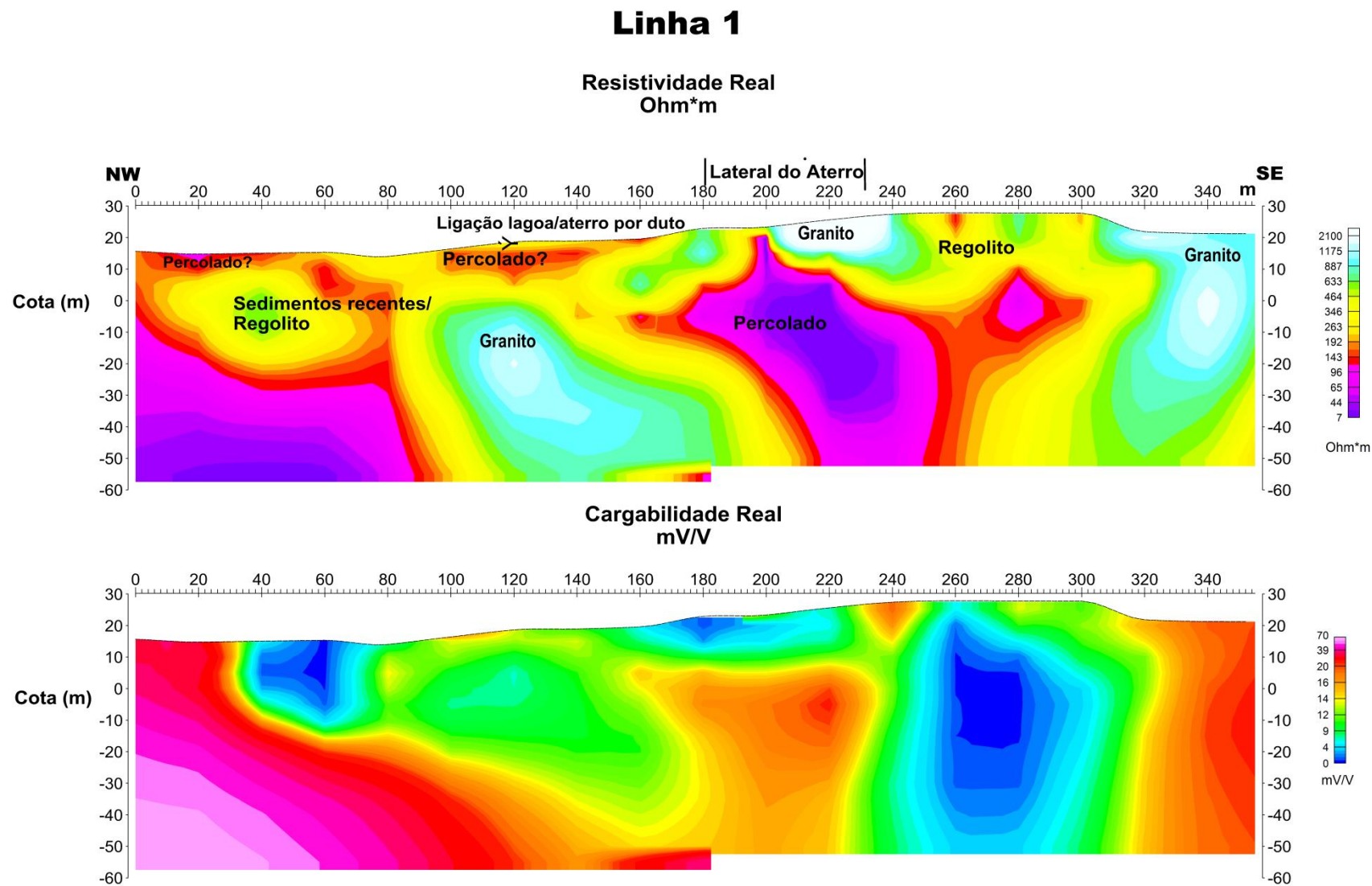


FIGURA 44: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 1.

As FIGURAS 45 e 46 exibem, respectivamente, as pseudoseções e os modelos de profundidade da resistividade e da cargabilidade da Linha 2, e possui direção N-S com extensão de 520 m. Foram identificadas variações de resistividade entre 0,5 e superiores a 8707 $\Omega.m$ e de cargabilidade entre 4 e 27 mV/V. No painel superior da FIGURA 46, o depósito atual está delineado, lateral e em profundidade, entre as estações 25 e 220 m, através de baixas resistividades. Dentro deste contexto, valores menores que 50 $\Omega.m$ foram interpretados como resposta do percolado.

Na mesma figura, entre as estações 220 e 400 m, as altas resistividades (> 1.000 $\Omega.m$) correspondem a blocos/matações de granitos, associados a coberturas areno-argilosas ou areno-siltico-argilosas. Já entre as estações 400 e 460 m, as baixas resistividades (150-350 $\Omega.m$) são explicadas pela presença de drenagem. Por outro lado, relações entre baixas resistividades e baixas cargabilidades, características do percolado, só são observadas entre as estações 80 e 120 m (painéis superior e inferior).

Em profundidade, valores muito elevados de cargabilidade, entre as estações 160 e 200 m e entre 380 e 420 m podem ser reflexo de sulfetos metálicos no substrato granítico ou outro material desconhecido.

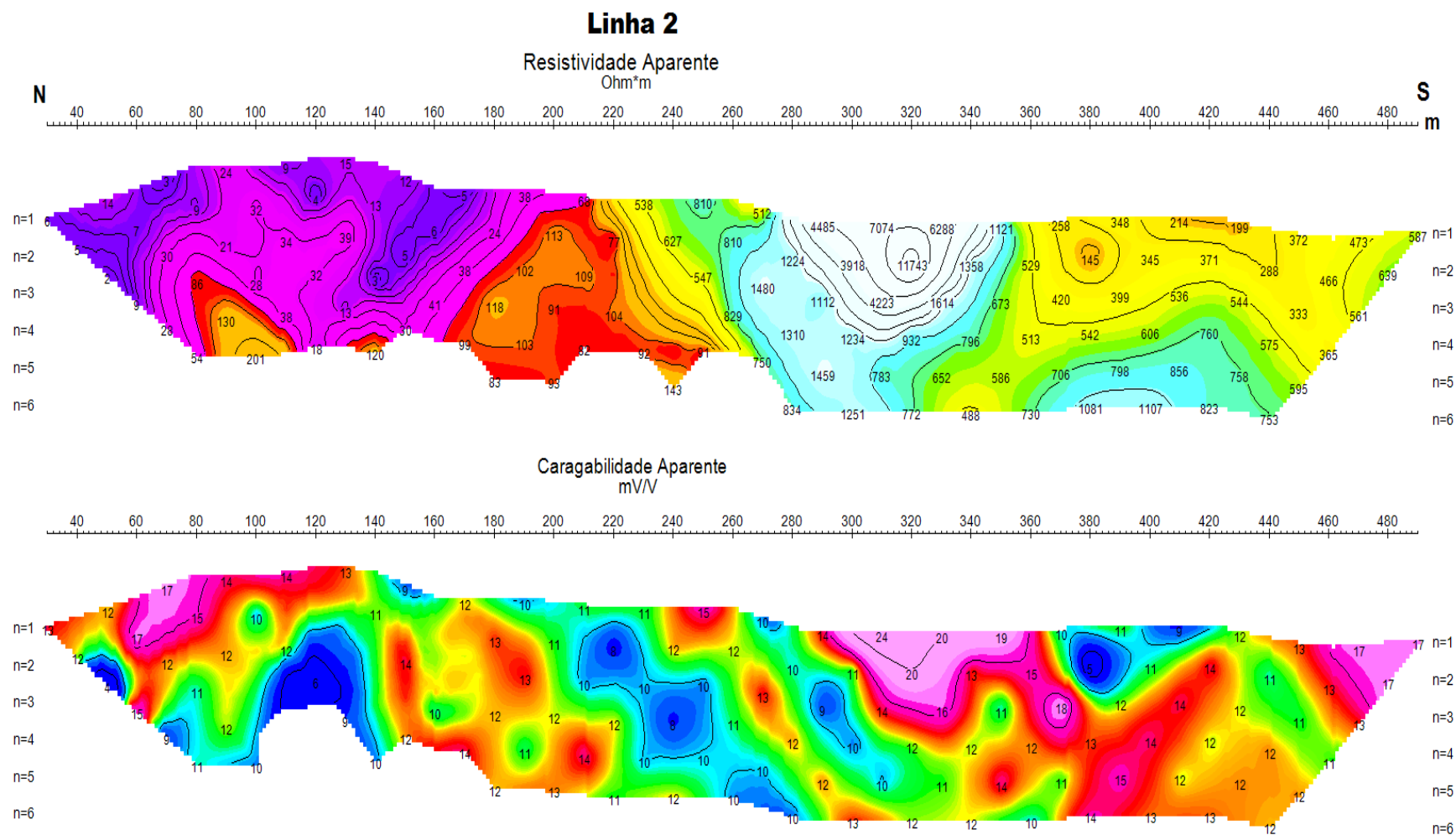
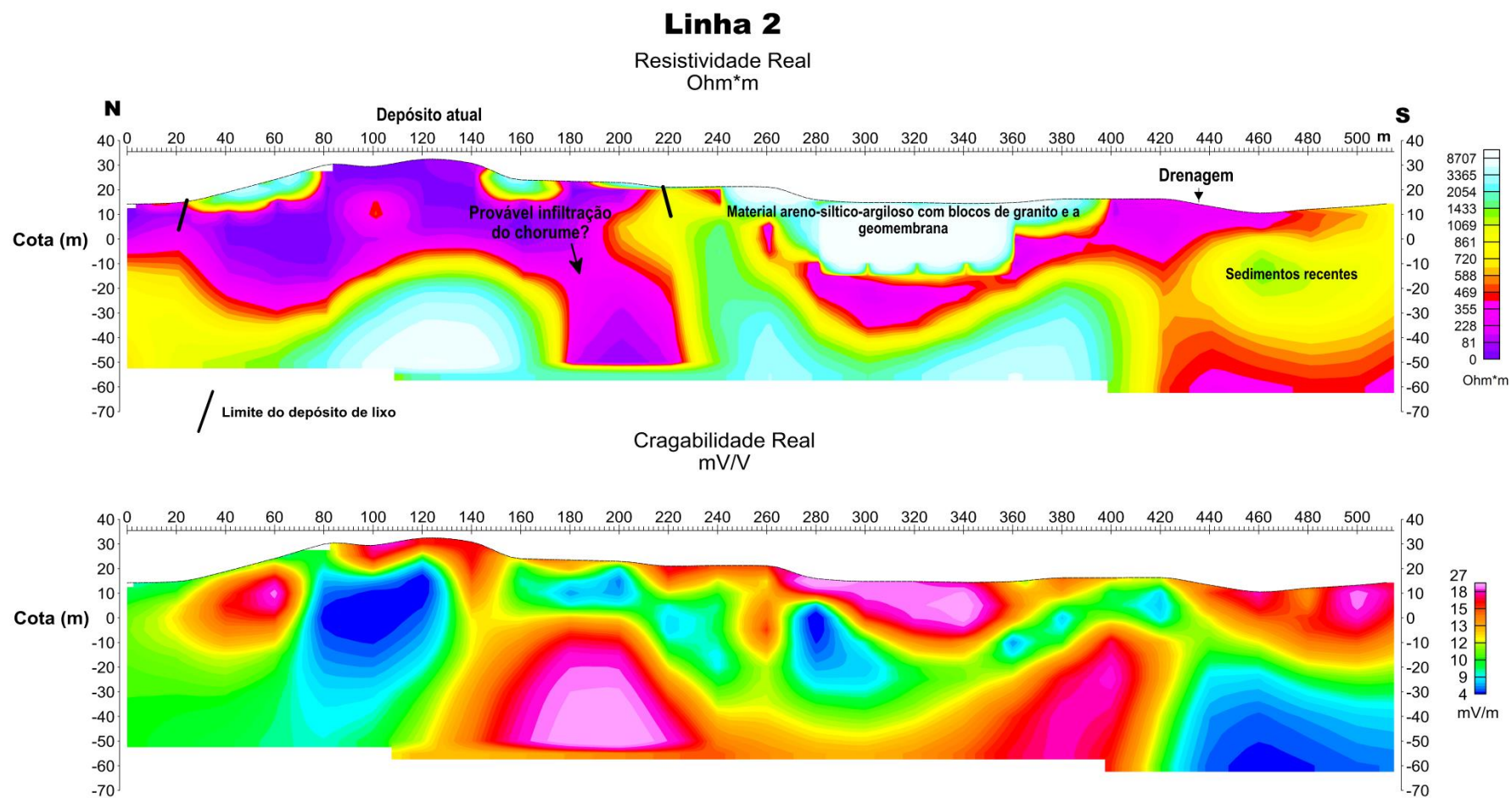


FIGURA 45: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 2.



As FIGURAS 47 e 48 indicam, respectivamente, as pseudoseções e os modelos de profundidade da resistividade e cargabilidade da Linha 3, e possui direção N-S com uma extensão de 400m. De acordo, com a FIGURA 50, foram identificadas variações de resistividade entre 1 e superiores a 27000 $\Omega.m$ e de cargabilidade entre 0 e 46 mV/V.

O modelo de resistividade do painel superior da FIGURA 48 ilustra de forma clara a extensão do percolado, tanto lateral como em profundidade, entre o extremo setentrional da seção e a estação 180 m. Já entre a estação 180m e o limite meridional do modelo predominam altas resistividades ($> 4000 \Omega.m$), que correspondem aos intervalos entre os níveis superficiais até a profundidade de 10 m, reflexo da geomembrana associada a material de recobrimento do antigo lixão. Por outro lado, na porção inferior a este trato resistivo foi observado um núcleo condutivo ($< 150 \Omega.m$) o qual pode estar associado ao percolado.

Conforme se observa no painel inferior da FIGURA 48, os baixos valores de cargabilidade só em parte coincidem com índices baixos de resistividade, o que reflete o chorume condutivo e não polarizável.

Linha 3

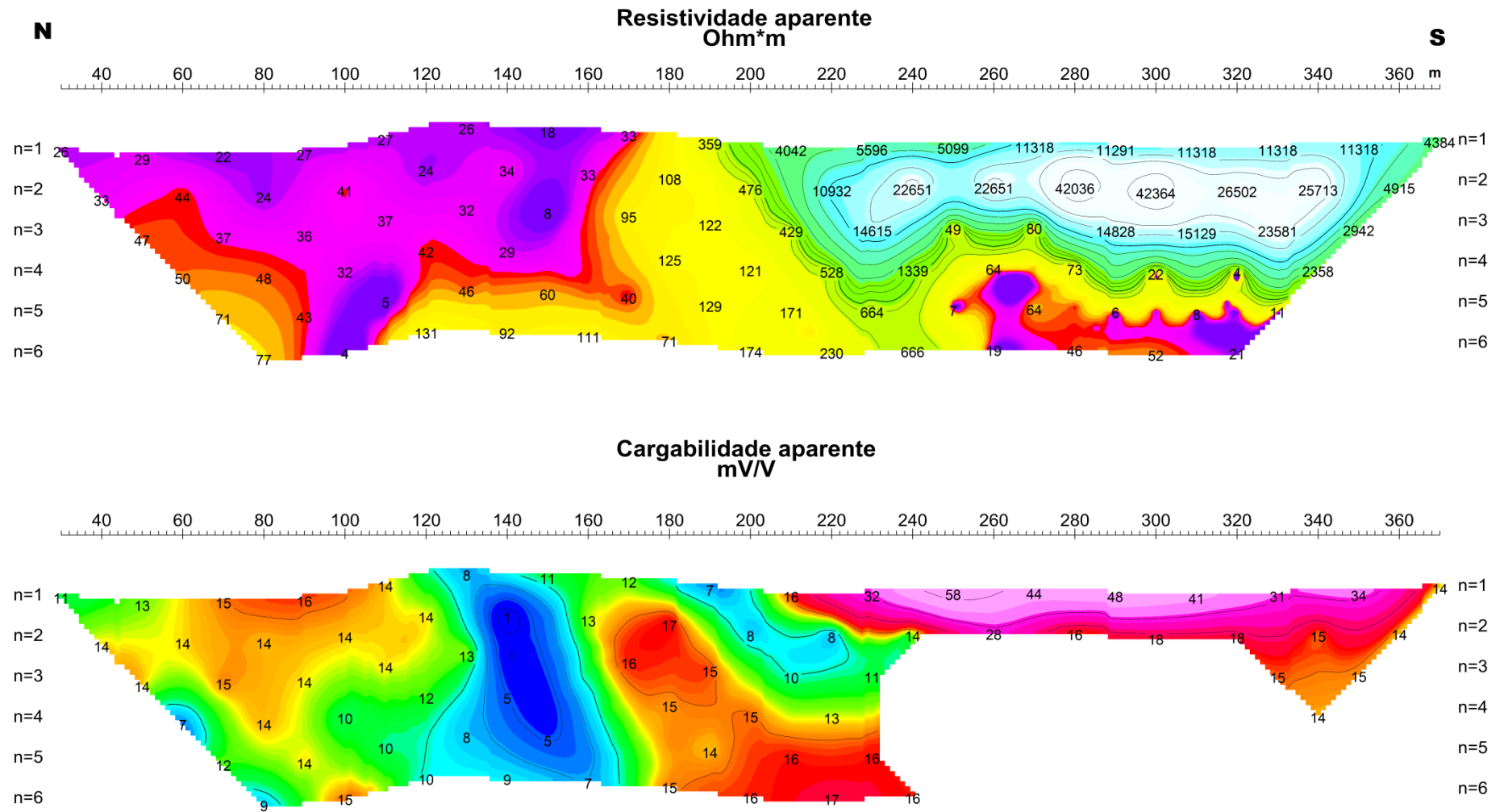


FIGURA 47: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 3.

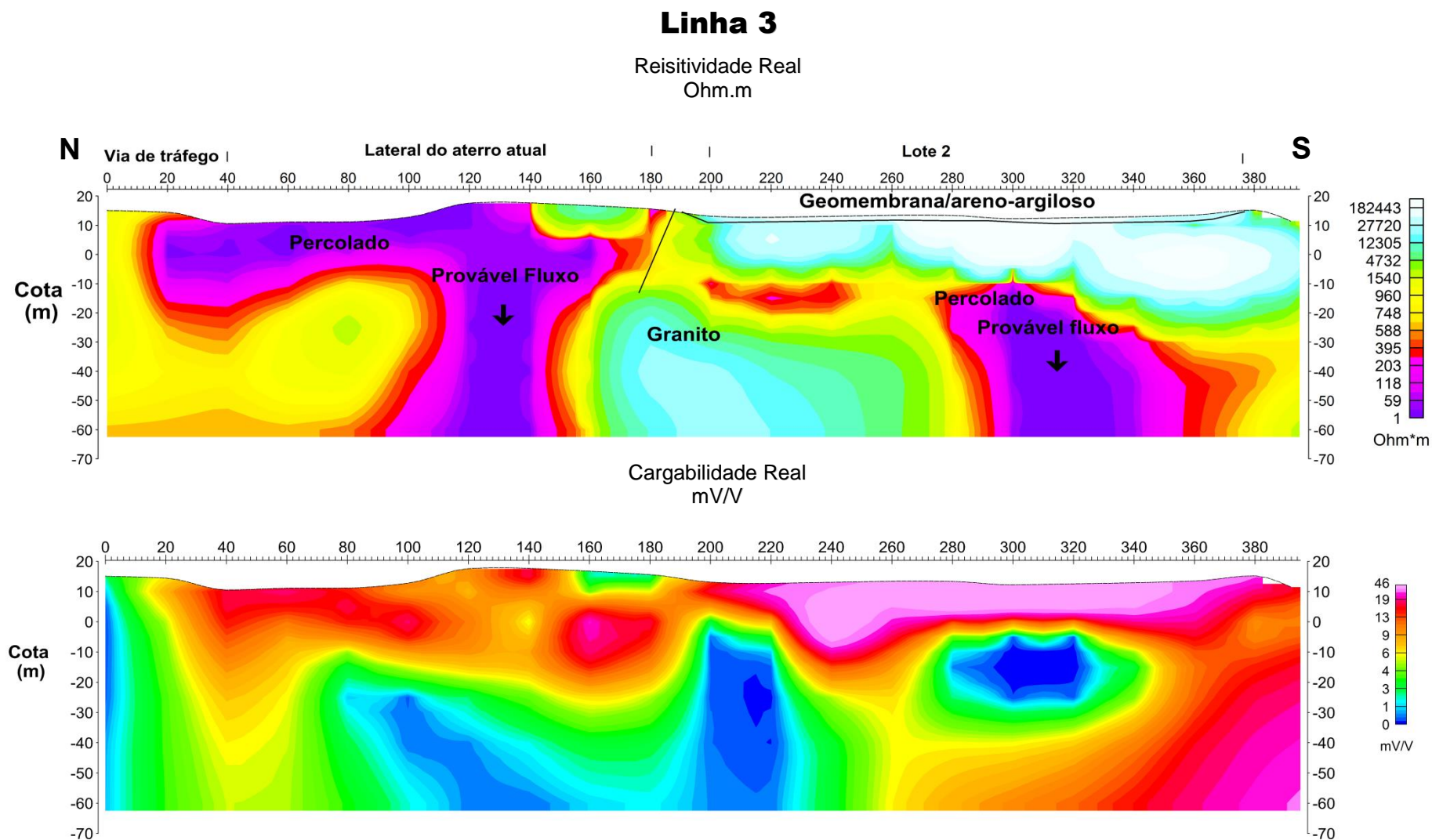


FIGURA 48: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 3.

As FIGURAS 49 e 50 ilustram, respectivamente, as pseudoseções e os modelos de profundidade da resistividade e da cargabilidade da Linha 4, que foi perfilada também na direção N-S, com extensão de 340 m. No painel superior da FIGURA 50, entre as estações 0 e 140m, se observa uma expressiva camada condutiva ($<50 \Omega.m$), a qual pode estar relacionada ao percolado. Dois outros níveis subordinados são registrados entre as estações 150 e 220 m e 220 e 320 m. Neste painel superior, valores intermediários e elevados foram associados, respectivamente, aos sedimentos e aos granitos.

Todos os níveis de baixa resistividade estão parcialmente associados a baixas cargabilidades, caracterizando a assinatura geofísica do contaminante. Entretanto, em profundidade, entre as estações 200 e 220 m, observa-se uma forte anomalia de cargabilidade sem que se saiba ao certo a sua origem.

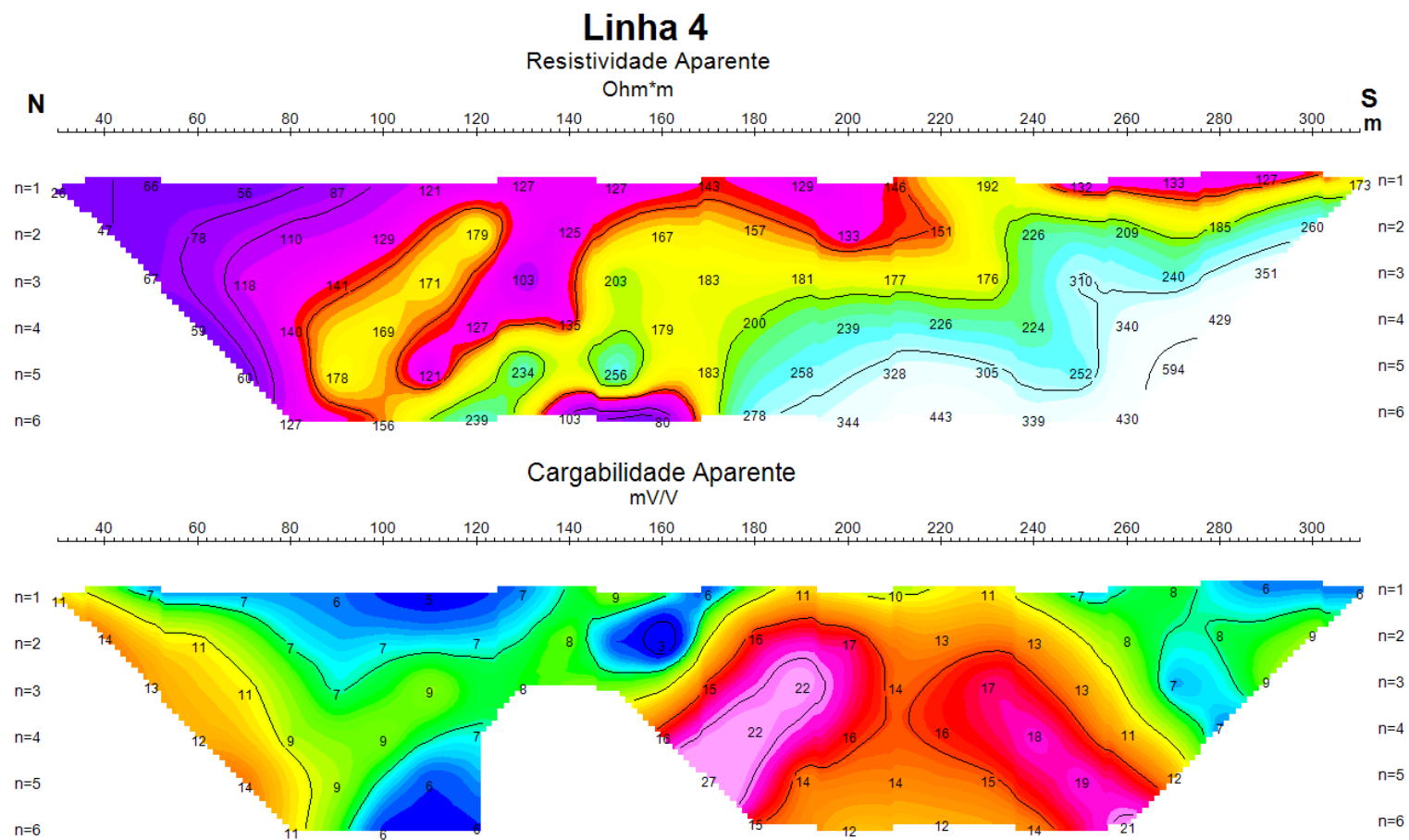


FIGURA 49: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 4.

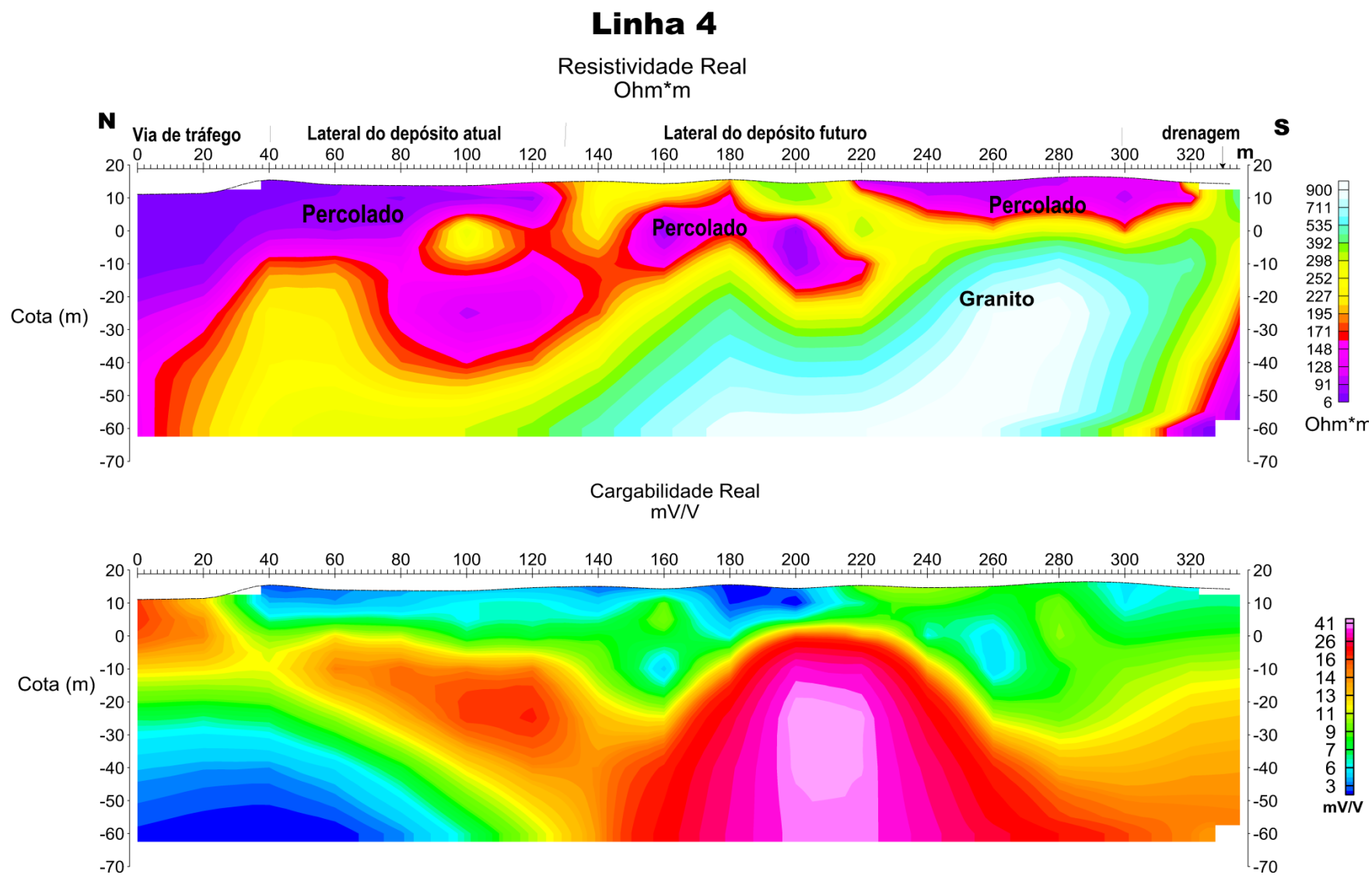


FIGURA 50: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 4.

As FIGURAS 51 e 52 mostram, respectivamente, as pseudoseções e os modelos de profundidade da resistividade e da cargabilidade da Linha 5, que foi executada na direção W-E, com extensão de 180 m

No painel superior da FIGURA 54, entre a estação 60 m e a extremidade oriental do modelo, as baixas resistividades ($<50 \text{ Ohm.m}$) são bem delineadas, tanto lateralmente quanto em profundidade e correspondem ao percolado. Já entre as estações 0 e 60 m, valores intermediários e elevados foram associados, respectivamente, aos sedimentos e aos granitos. No painel inferior da FIGURA 54, se observa, entre as estações 60 e 80 m, uma forte anomalia de cargabilidade, sem que se saiba ao certo a sua origem.

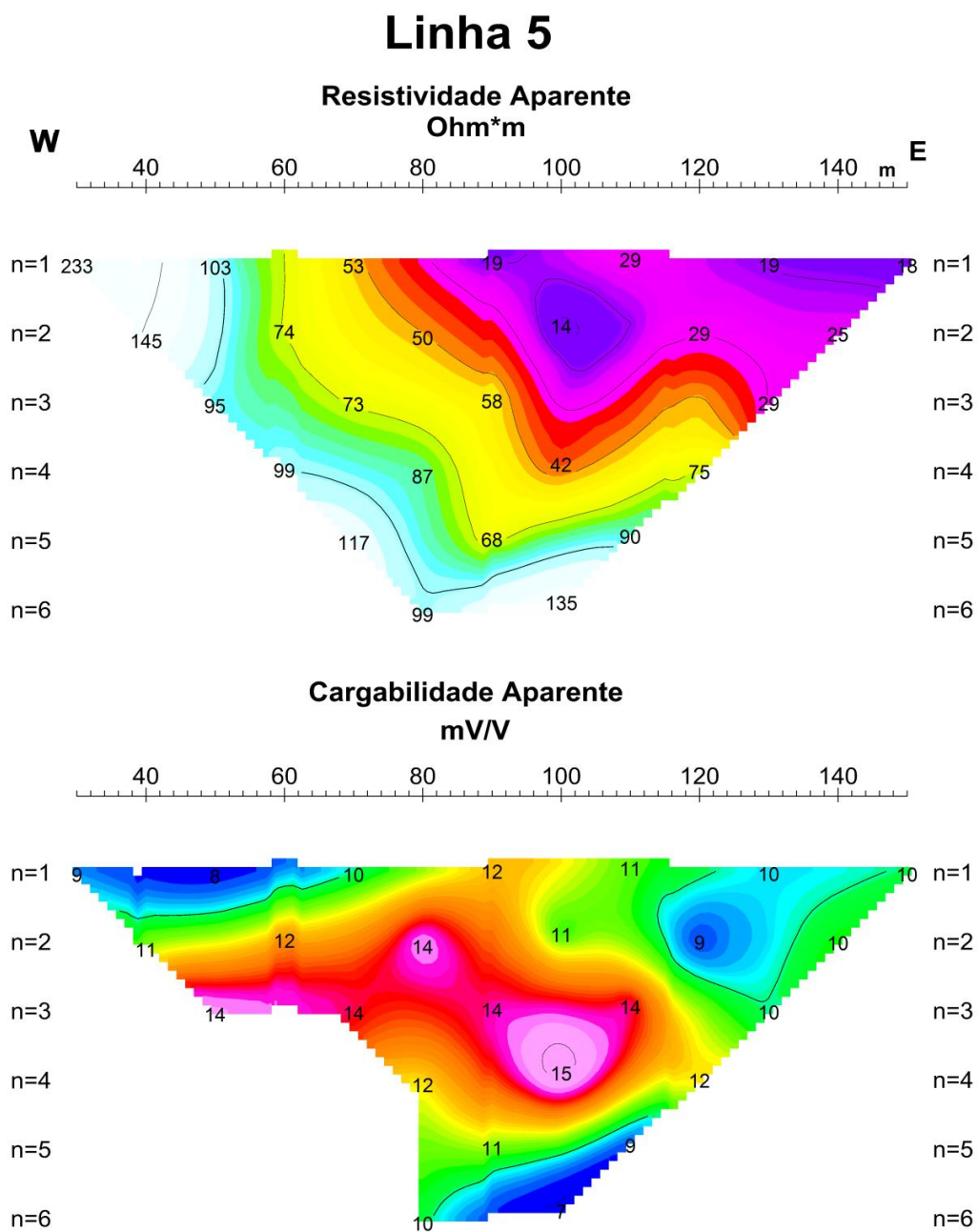


FIGURA 51: Pseudoseções de resistividade aparente (painel superior) e cargabilidade aparente (painel inferior) da Linha 5.

Linha 5

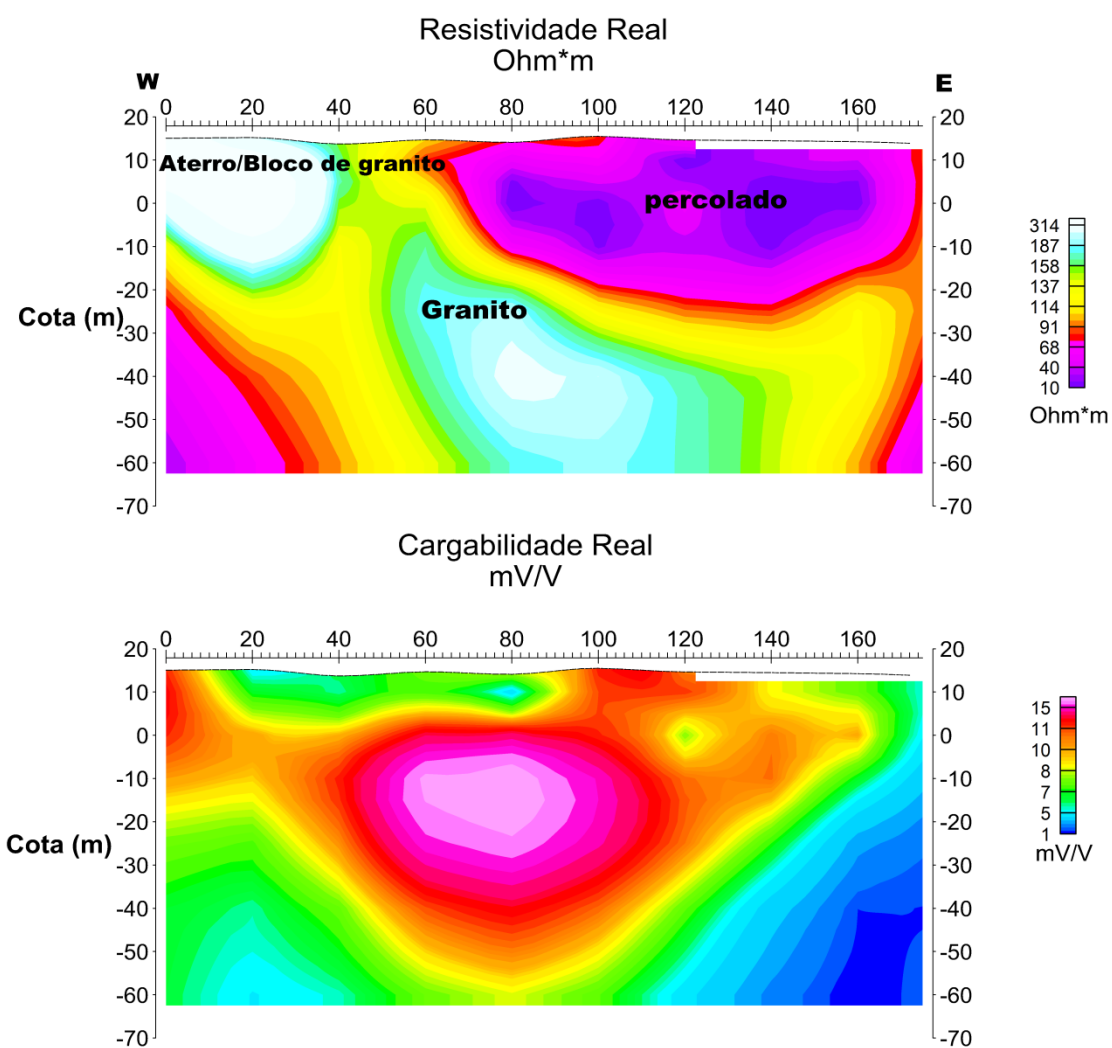


FIGURA 52: Modelo de profundidade da resistividade (painel superior) e da cargabilidade (painel inferior) da Linha 5.

As FIGURAS 53 a 56 indicam, respectivamente, os mapas de iso-resistividade dos seguintes níveis de profundidade: N2 = 6,5 m, N3 = 15,0 m, N4 = 25,0 m e N5 = 34,0 m. As FIGURAS 53 e 54 exibem com clareza o contraste entre as porções setentrional (baixas resistividades) e meridional (altas resistividades), até uma profundidade de 15 m. As baixas resistividades do segmento setentrional refletem o percolado, enquanto as elevadas resistividades do segmento meridional constituem respostas do substrato granítico. O setor setentrional da FIGURA 55 revela a continuidade do percolado até uma profundidade de 25 m, enquanto no setor meridional, além do substrato resistivo se observa um núcleo de baixa resistividade, entre as linhas L3 e L4, que pode se relacionar ao percolado do antigo lixão ou migração da porção setentrional para a meridional.

Os mapas de isocargabilidade correspondem aos níveis dos mapas de iso-resistividade, e seguem no anexo II.

Na porção setentrional dos mapas mencionados, correspondente ao contaminante, se observa que a cargabilidade nos níveis mais rasos é baixa a intermediária aumentando com a profundidade, o que pode refletir a presença de material metálico (polarizável) no depósito. Na porção meridional a cargabilidade é alta progredindo para cargabilidades mais baixas, e se observa um marcante fluxo de percolado oriundo da porção setentrional ou do aterro atual, migrando para porções orientais e meridionais da área.

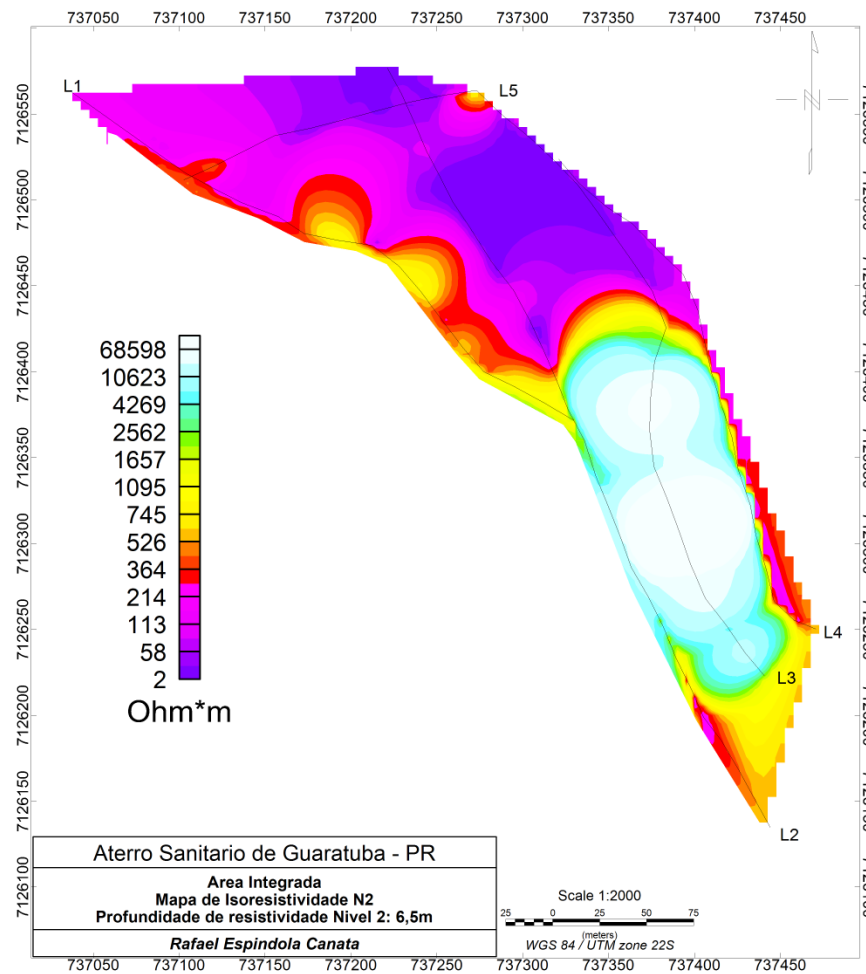


FIGURA 53: Mapa de isoresistividade nível 2 de profundidade de 6,5m.

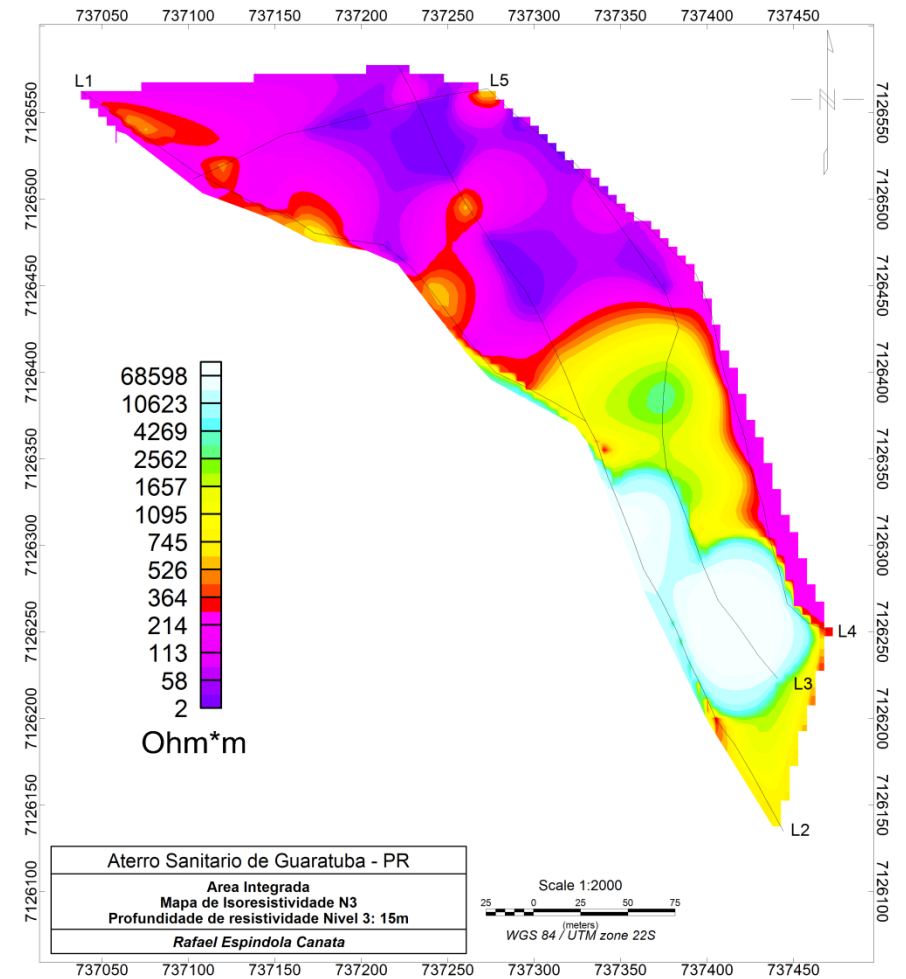


FIGURA 54: Mapa de isoresistividade nível 3 de profundidade de 15m.

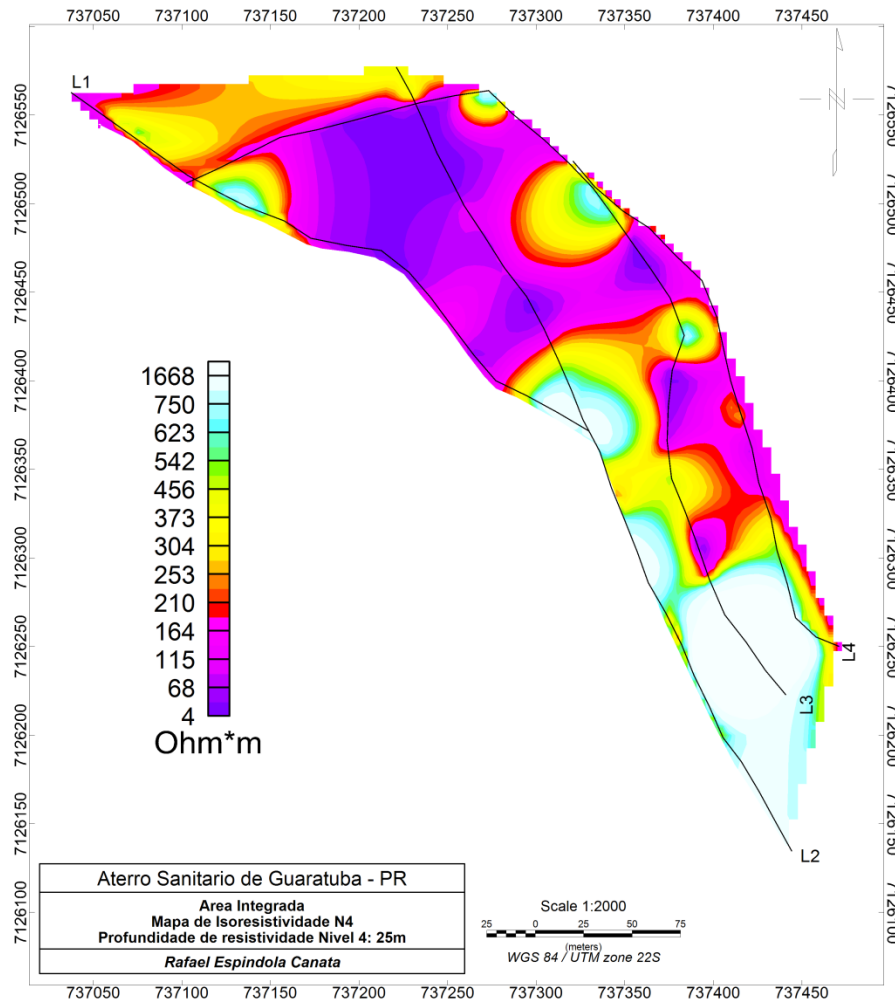


FIGURA 55: Mapa de isoresistividade nível 4 de profundidade de 25m.

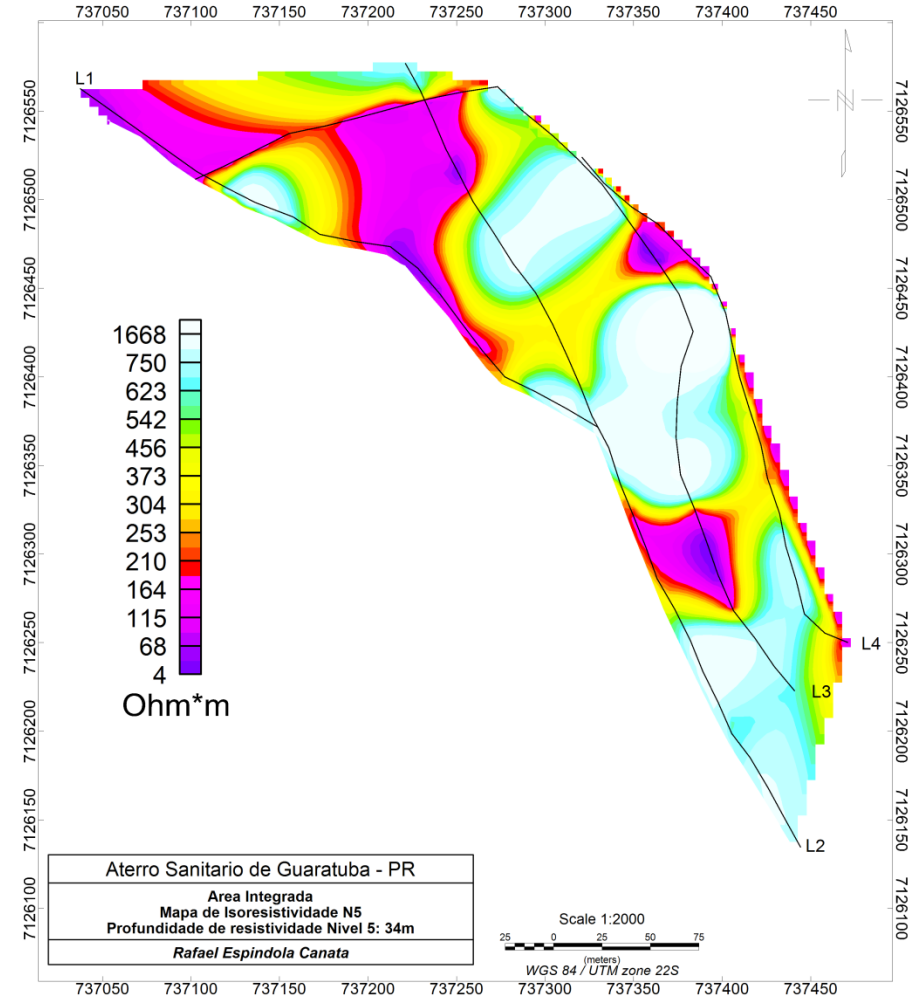


FIGURA 56: mapa de isoresistividade nível 5 de profundidade de 34m.

6.3. Métodos eletromagnéticos

6.3.1. EM343-3

Os dados do levantamento com o método EM34-3 foram plotados em gráficos da condutividade aparente (mS/m) *versus* distância/estações (m), cujos perfis estão localizados na FIGURA 42.

O perfil EM34-3A, FIGURA 57, foi realizado no entorno de todo o aterro sanitário, totalizando 1.070m, no qual se observa dois padrões distintos: um representado por condutividades aparentes baixas a intermediárias (8-26 mS/m), nas duas extremidades do perfil, reflexo de tratos não contaminados, e outro caracterizado por elevadas condutividades (26-62 mS/m) na porção central do perfil, aproximadamente entre as estações 360 e 520 m, as quais devem estar associados ao percolado.

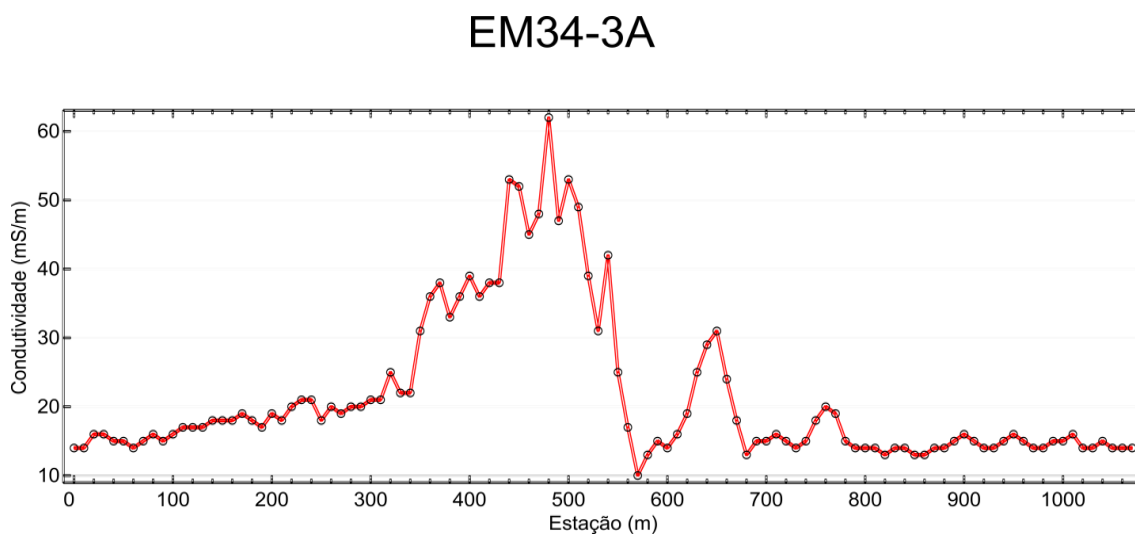


FIGURA 57: Resultados do perfil EM34-3A (vide localização na Figura 42).

A FIGURA 58 mostra os perfis EM34-3B, EM34-3C e EM34-3D que foram levantados no depósito futuro, com extensões de 60 m, 70 m e 100 m, respectivamente. Conforme se observa naquela figura, os baixos valores de condutividade (<15 mS/m) refletem os sedimentos e granitos na área.

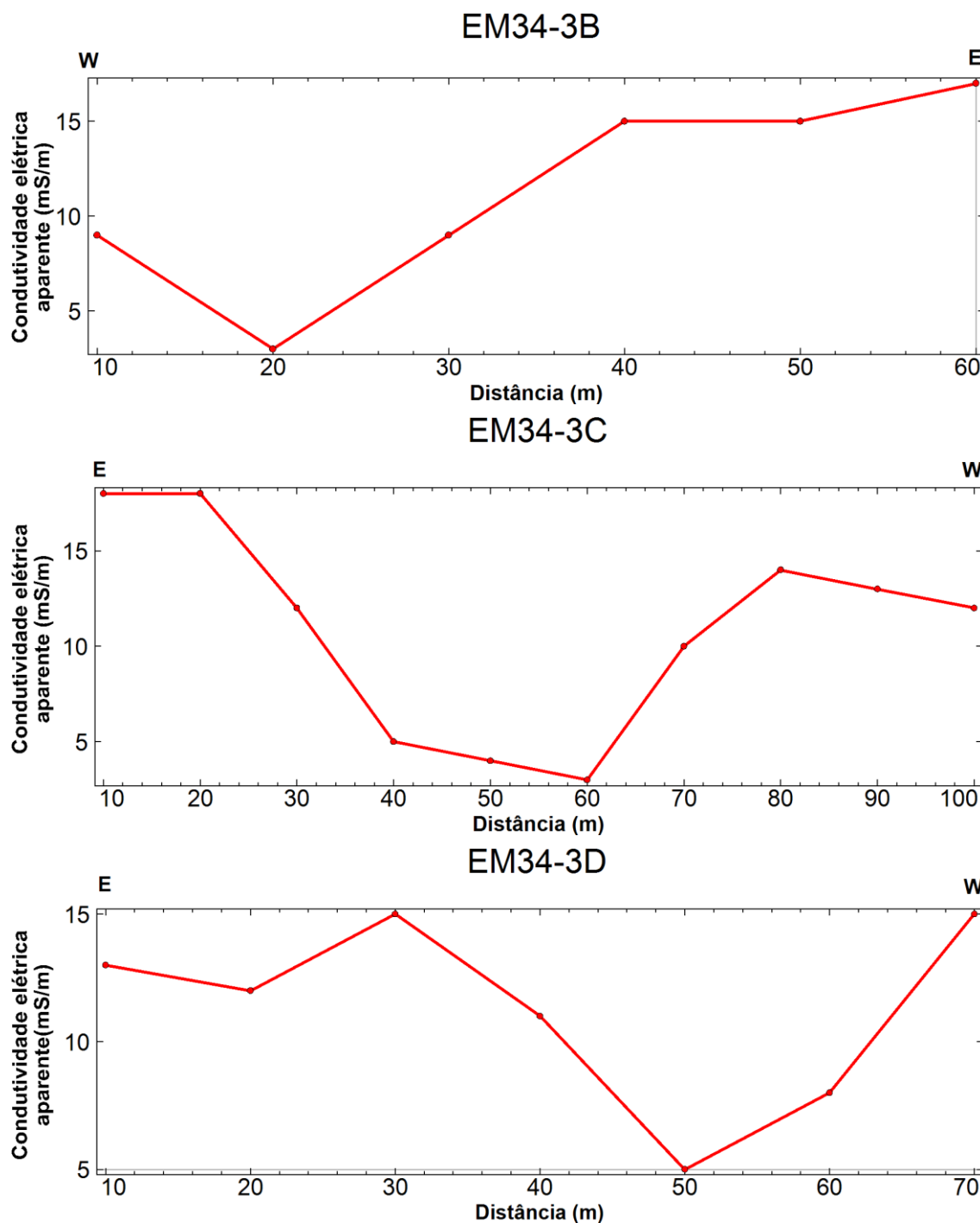


FIGURA 58: Resultados dos perfis EM34-3B, EM34-3C e EM34-3D (vide localização na Figura 42).

A FIGURA 59 ilustra o perfil EM34-3E, que foi levantado no sentido E-W (FIGURA 42), onde se observa entre as estações 30 e 80 m valores de condutividade aparente superiores a 25 mS/m, portanto associados ao percolado. Já os valores inferiores a 14 mS/m refletem os sedimentos e granitos.

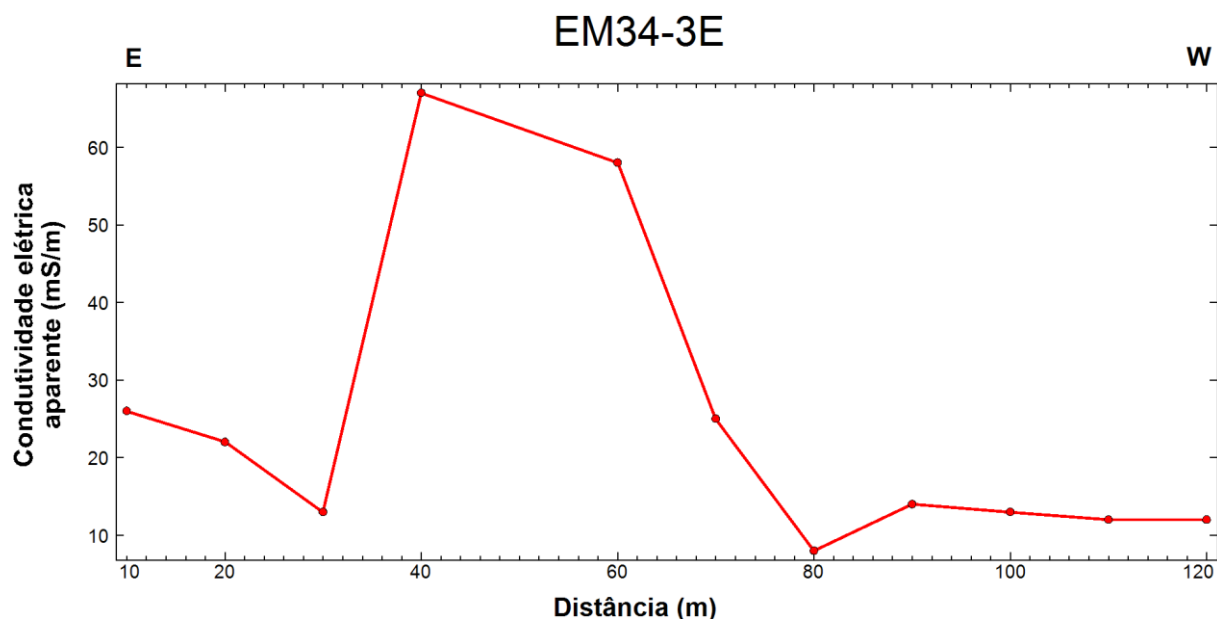


FIGURA 59: Resultados do perfil EM34-3E (vide localização na Figura 42).

A FIGURA 60 mostra o perfil EM34-3F, o qual foi adquirido sobre o depósito futuro, no sentido S-N (FIGURA 42), cujos valores de condutividade aparente são superior a 23 mS/m), reflexo do percolado.

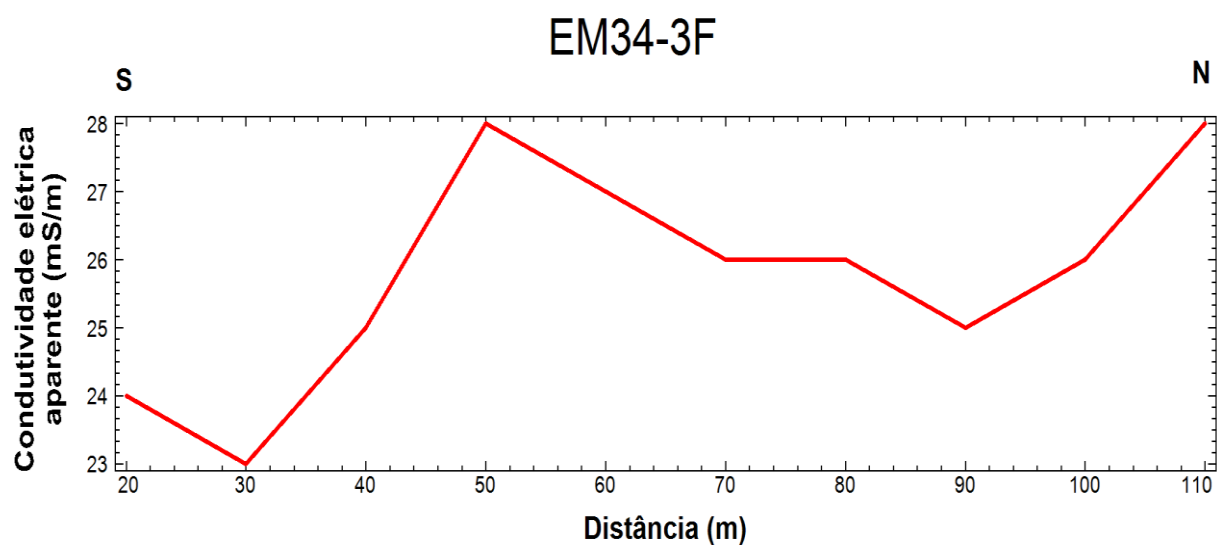


FIGURA 60: Resultados do perfil EM34-3E (vide localização na Figura 42).

6.3.2. Integração ER e EM34-3

O perfil EM34-3A foi subdividido em três segmentos (EM34-3A1, EM34-3A2, EM34-3A3), que juntamente com o perfil EM34-3F estão representados na FIGURA 61, em correspondência, respectivamente, aos modelos de resistividade das linhas L4, L5, L1 e L3, conforme a TABELA 8.

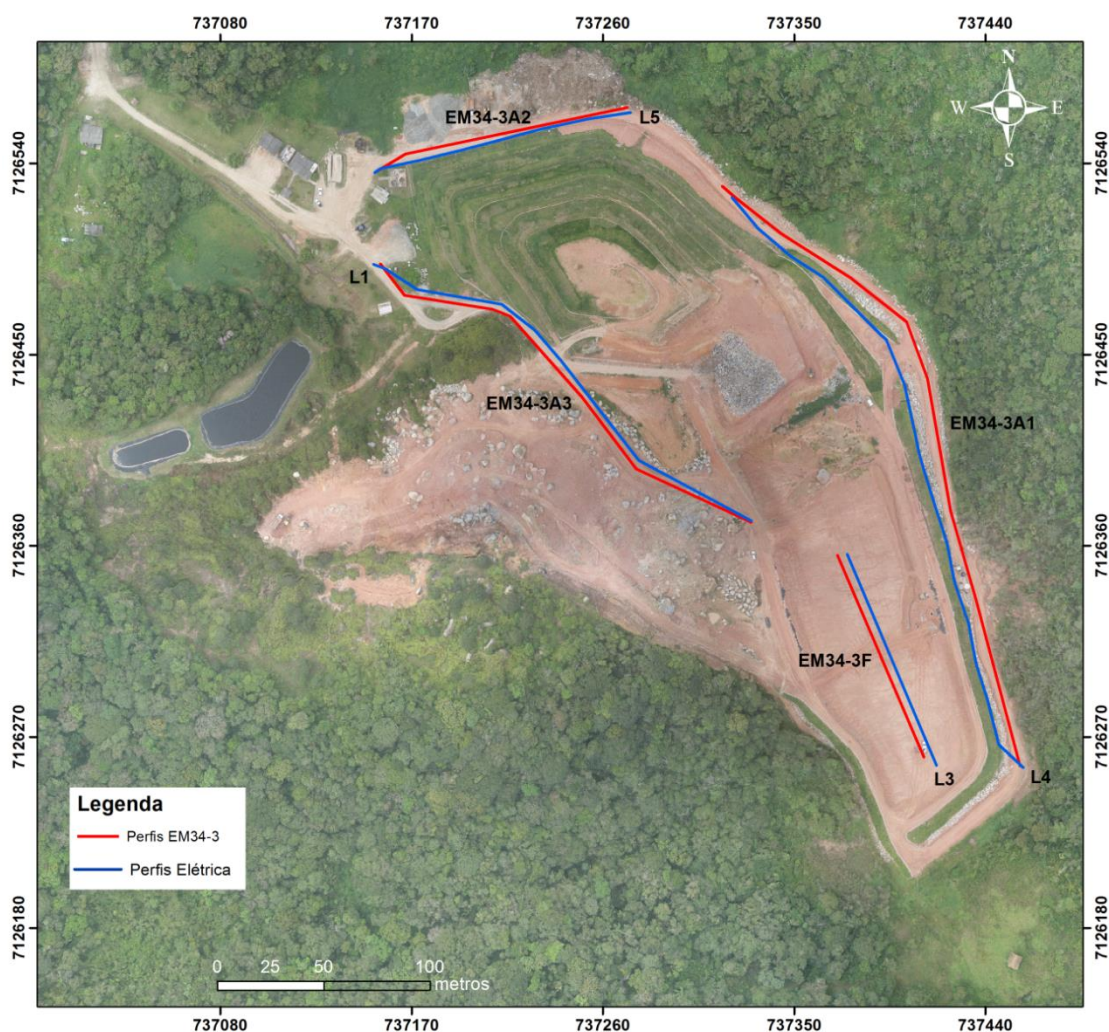
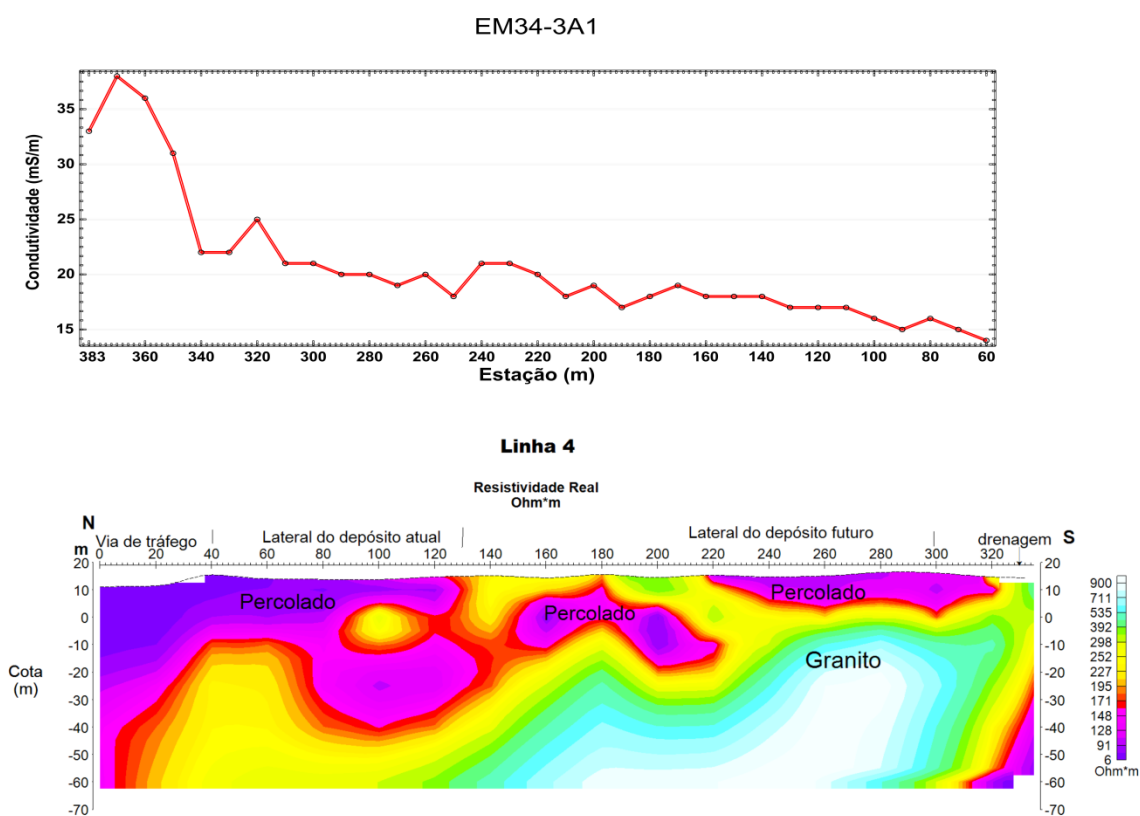


FIGURA 61: Mapa com a correlação espacial entre os perfis elétricos e eletromagnéticos (EM34-3).

TABELA 8: Perfis EM34-3 correlacionados com o modelo real de resistividade.

Perfil correlacionado	EM34-3	Modelo Resistividade	Extensão (m)
1	A1	Linha 4	320
2	A2	Linha 5	120
3	A3	Linha 1	220
4	F	Linha 3	110

No perfil de correlação 1 (TABELA 8), FIGURA 62, valores elevados de condutividade aparente, entre 20 e 35 mS/m e baixos de resistividade (<50 Ohm.m) são indicativos do percolado.

**FIGURA 62:** Perfil de correlação 1 (TABELA 8) indicando os dados de condutividade aparente (painel superior) e os de resistividade (painel inferior).

No perfil de correlação 2 (TABELA 8), FIGURA 63, valores de condutividade aparente entre 20 e 60 mS/m (painel superior) e de resistividades menores que <50 Ohm.m (painel inferior) estão associados ao percolado.

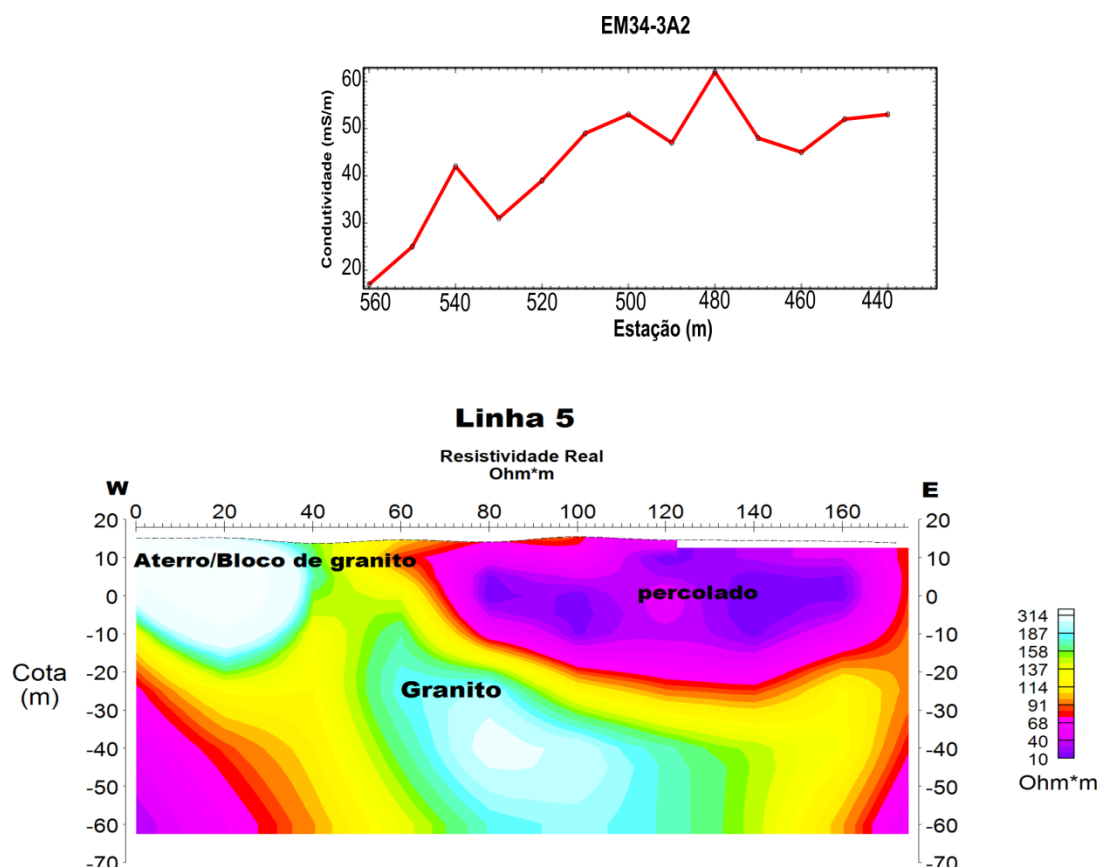


FIGURA 63: Perfil de correlação 2 (TABELA 8) indicando os dados de condutividade aparente (painel superior) e os de resistividade (painel inferior).

No perfil de correlação 3 (TABELA 8), FIGURA 64, valores de condutividade aparente entre 25 e 30 mS/m (painel inferior) e de resistividade menores que 50 Ohm.m, igualmente, estão associados ao percolado. Entretanto, não se verifica uma perfeita correlação espacial, talvez em função do perfil eletromagnético se localizar mais afastado do aterro.

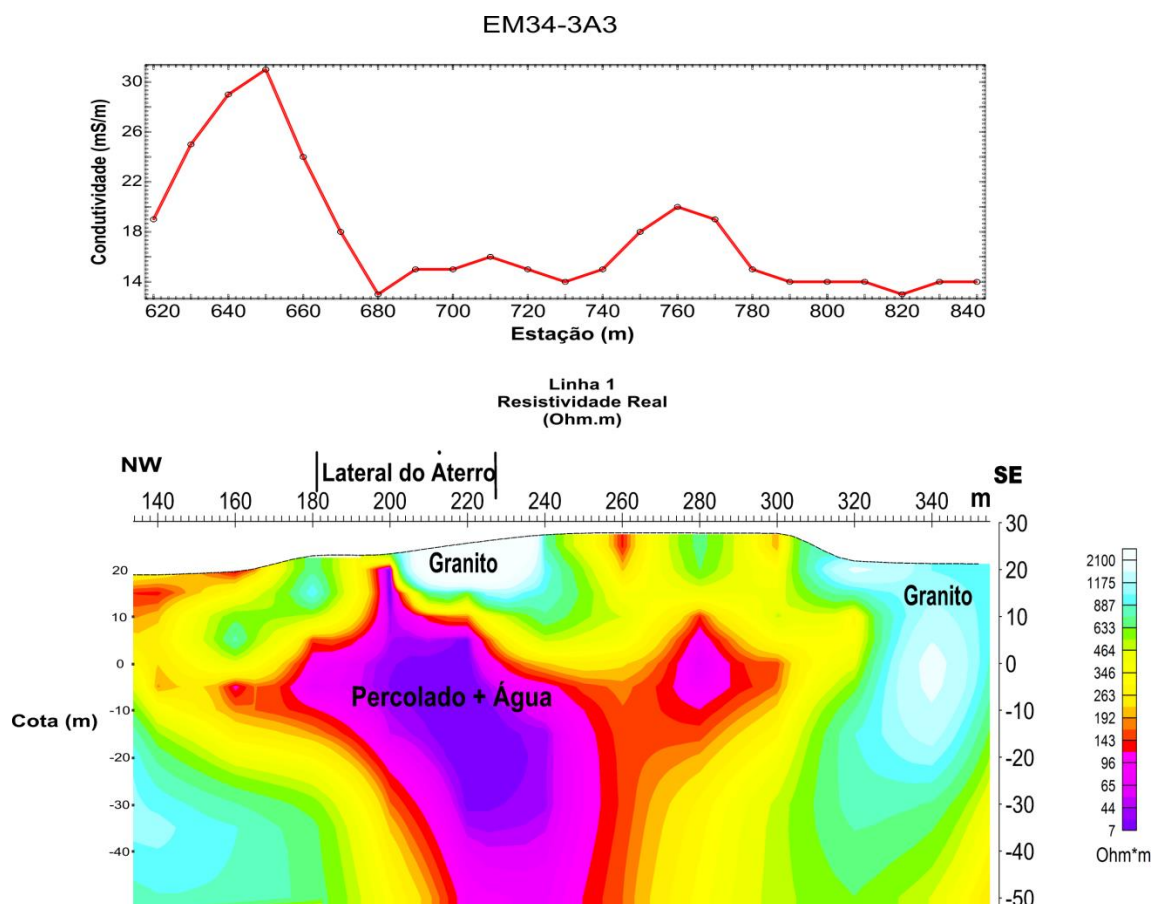


FIGURA 64: Perfil de correlação 3 (TABELA 8) indicando os dados de condutividade aparente (painel superior) e os de resistividade (painel inferior).

No perfil de correlação 4 (TABELA 8), FIGURA 65, valores de condutividade aparente entre 23 e 28 mS/m (painel superior) e de resistividade menores que 50 Ohm.m estão também associados ao percolado em profundidade. Os resultados eletromagnéticos característicos do chorume só foram alcançados em decorrência do emprego do espaçamento de 40 m entre as bobinas.

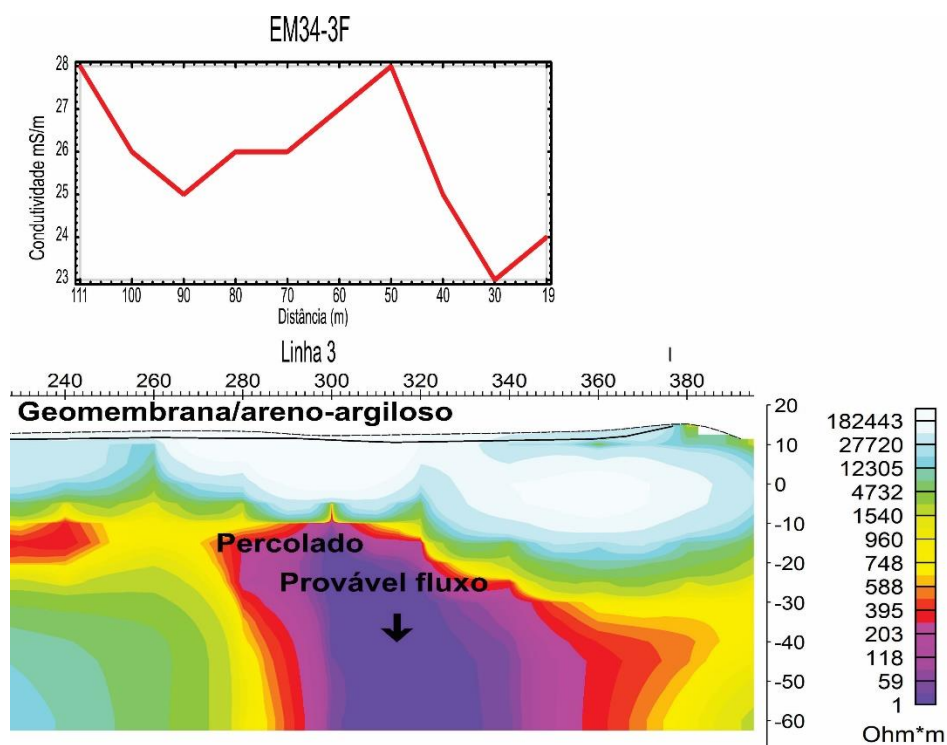


FIGURA 65: Perfil de correlação 4 indicando os dados de condutividade aparente do perfil EM34-3F (painel superior) e o correspondente modelo de resistividade da Linha 3 (painel inferior).

A correlação entre os dados elétricos e eletromagnéticos permitiu identificar áreas possivelmente contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas, conforme a FIGURA 66 e a TABELA 9.

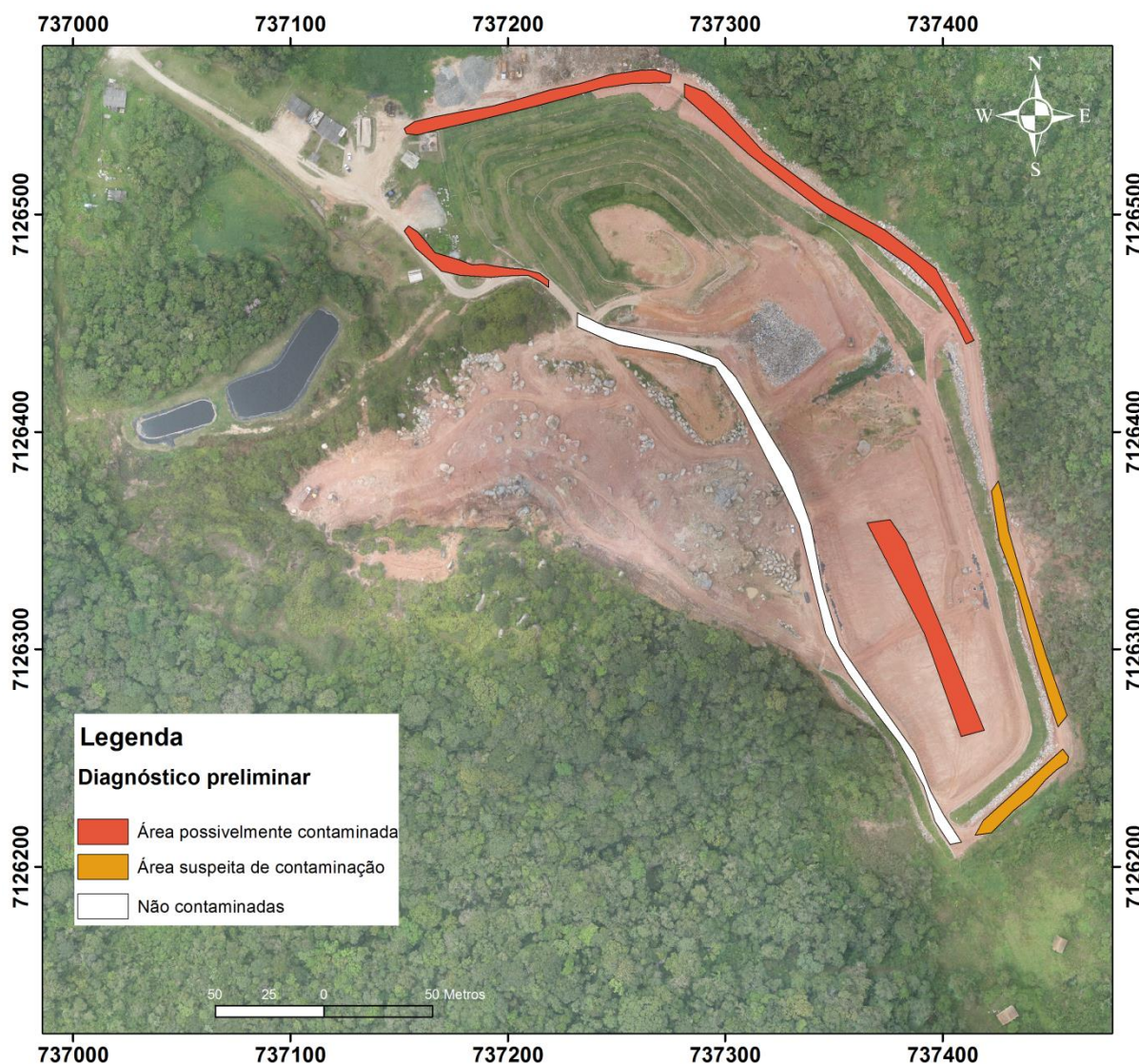


FIGURA 66: Mapa sugestivo das áreas possivelmente contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas.

TABELA 9: Parâmetros característicos de áreas contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas.

Áreas	Resistividade (Ohm.m)	Condutividade (mS/m)
Contaminadas	<50	>20
Suspeita de contaminação	50-70	15 a 20
Não contaminadas	>70	<15

6.3.3. GPR

Os radargramas que refletiram os melhores resultados adquiridos com o GPR foram interpretados, os quais são denominados de (GPR1, GPR6/GPR6A e GPR3).

As etapas de processamento dos dados de GPR correspondem: aquisição de dados, edição dos dados, processamento do sinal (básico e avançado) e exibição da imagem processada. Os processamentos realizados serão descritos a seguir:

- Importação dos dados: consistiu em criar uma pasta, projeto, com todos os dados adquiridos em campo, conversão no formato DT para DAT e importação para o programa ReflexW;
- Subtract (Mean Dewow): é um filtro utilizado para remover as baixas frequências no sinal de radar, atuando em cada traço de acordo com a janela de tempo escolhido. Este intervalo deve ser ajustado para um período máximo;
- Station correction: define o tempo zero de cada traço ao longo do radargrama;
- Remove Background: este filtro elimina os ruídos coerentes das ondas diretas, ajudando a visualizar reflexões mais rasas.
- Gain: utilizou-se o energy gain para ressaltar a amplitude dos refletores mais profundos, compensando a atenuação do sinal com a profundidade.
- Migração/conversão tempo em profundidade: utilizou-se do filtro Kirchhoff para migrar os refletores para uma disposição adequada, através do ajuste hiperbólico para identificar a velocidade do meio (0,09 m/ns) utilizada em todos os radargramas para converter em profundidade.

A partir das verificações *in loco* e as interpretações realizadas nos radargramas possibilitaram a identificação do material (saibro) para recobrimento dos resíduos, manta geotêxtil, blocos de granitos em meio ao solo, possível camada de resíduo compactada e drenos no depósito atual e futuro.

A FIGURA 67 ilustra alguns dos elementos estruturais usados para construção do lote 2/depósito futuro (Perfil GPR3) e que foram interpretadas no radargrama, exemplificadas como a manta geotêxtil, camada de recobrimento

(areno-argilosa), fragmentos e blocos rochosos, e os drenos instalados para captação do chorume.



FIGURA 67: Ilustra os fragmentos rochosos que compõem a estrutura dos drenos e a presença da geomembrana. e a presença da geomembrana.

No perfil GPR3 interpretaram-se três camadas distintas e o ajuste hiperbólico resultou em uma medida de velocidade aproximada de 0,09 m/ns, as interpretações estão ilustrados na FIGURA 68.

(i) camada de aproximadamente 0,40 m de cobertura areno-síltico-argilosa/síltico-argilosa, a qual foi caracterizada por refletores às vezes contínuos ou aleatórios, com baixa a intermediária amplitude e intermediária atenuação. Na distância entre 60 e 110 m ocorrem refletores com altas amplitudes, que refletem os drenos entre a geomembrana e a cobertura areno-síltico-argilosa (FIGURA 68).

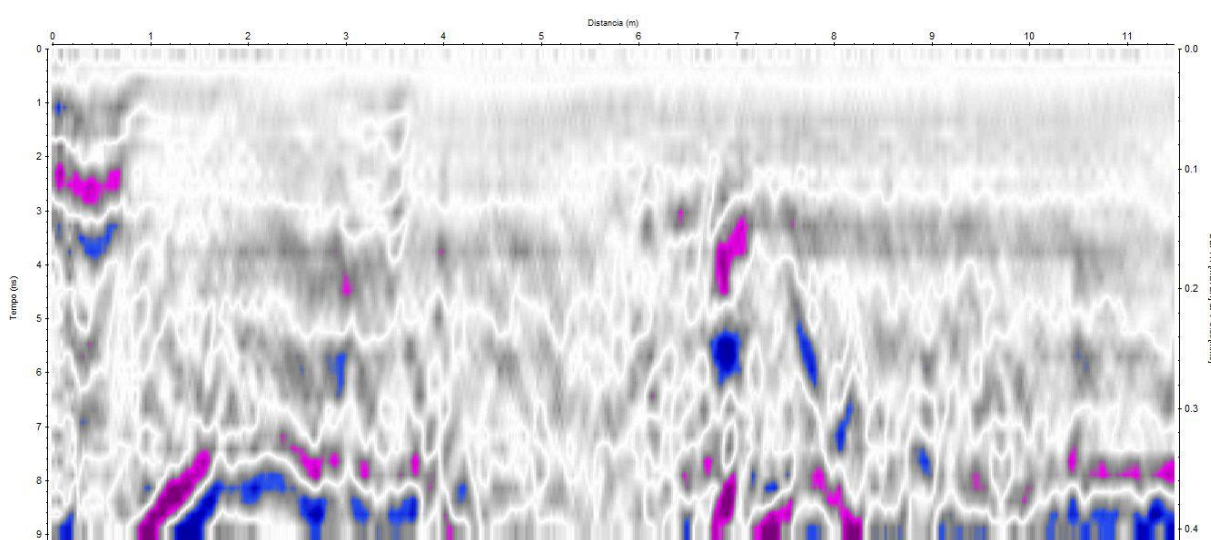


FIGURA 68: Refletores interpretados como material areno-síltico-argiloso.

(ii) segunda camada evidenciou um refletor com alta amplitude e contínuo ao longo da seção, a uma profundidade 0,40m, interpretada como a geomembrana (FIGURA 69);

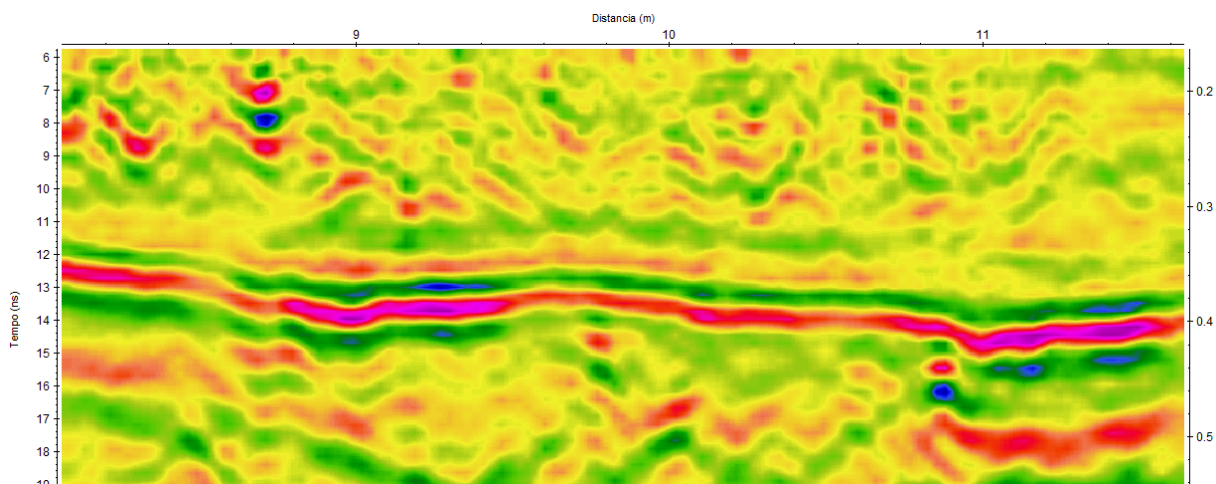


FIGURA 69: Refletor interpretado como a geomembrana.

(iii) a terceira camada composta por refletores com alta amplitude, e heterogêneos e as vezes inclinados e contínuos, os quais refletem a terraplanagem usada para recobrir o antigo lixão, ou rocha alterada e/ou possíveis resíduos. Ainda neste perfil, são evidenciados refletores com forte atenuação de sinal entre as distâncias 116 e 126 m, provavelmente em decorrência do percolado, conforme FIGURA 70.

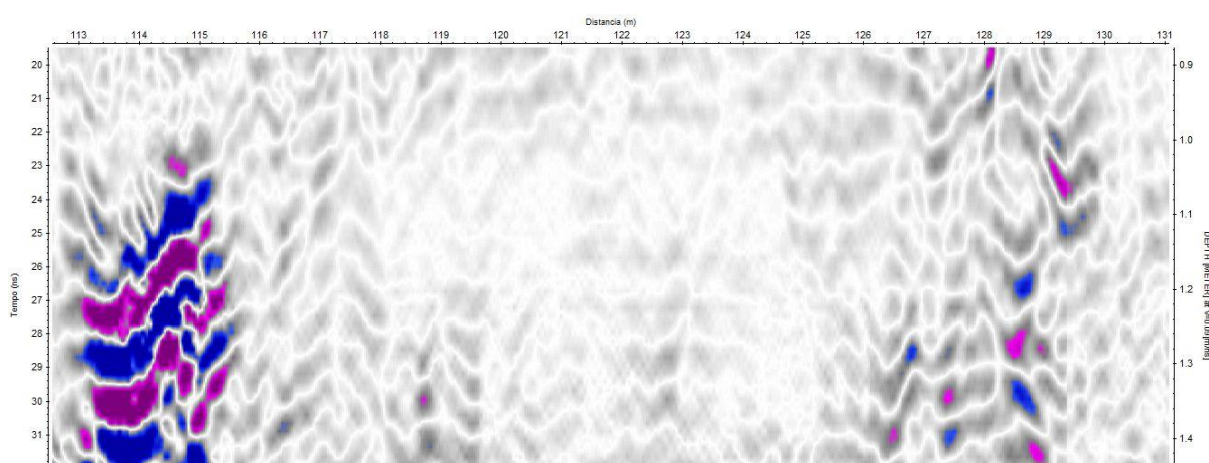


FIGURA 70: Atenuação de refletores provavelmente em decorrência do percolado.

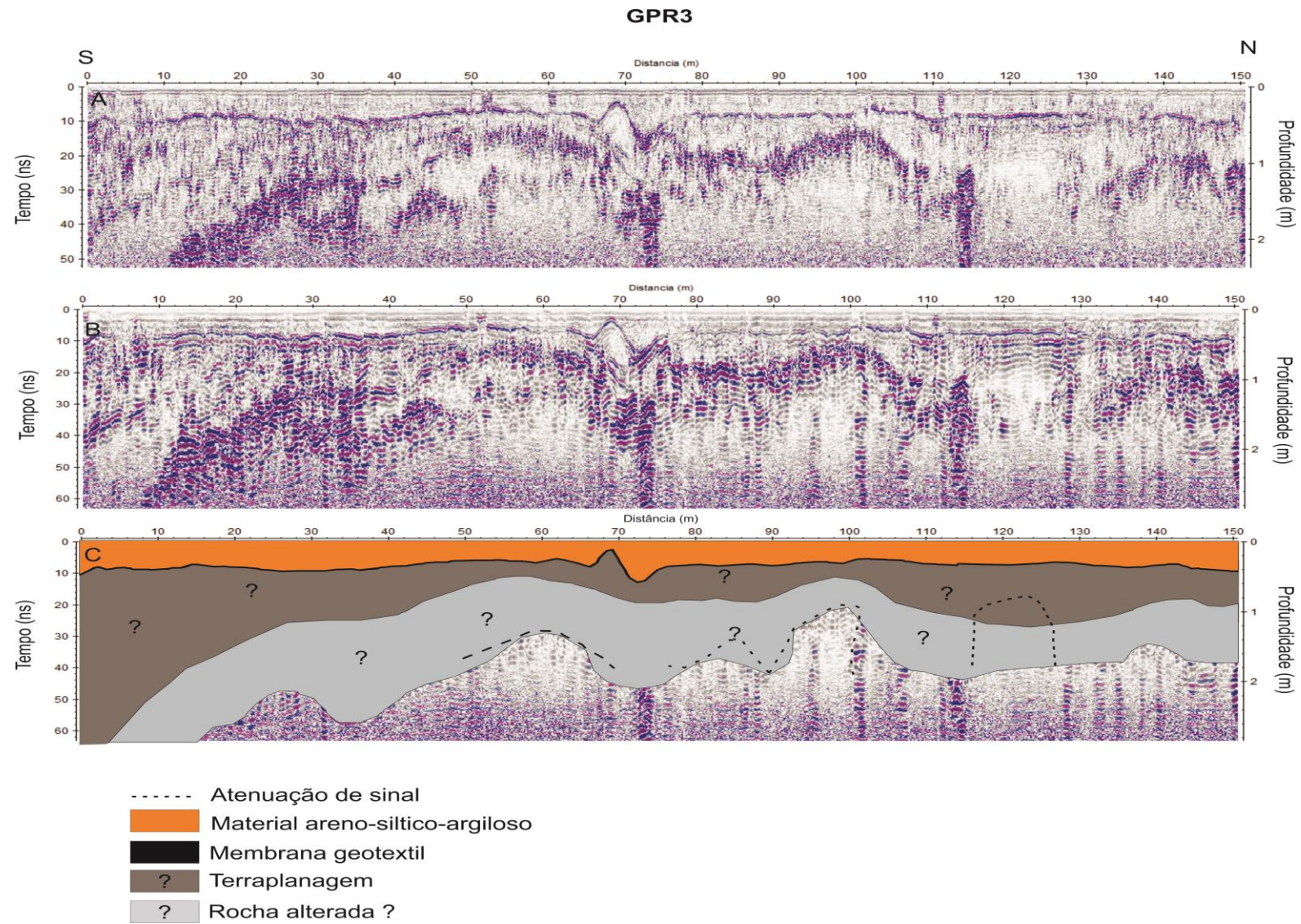


FIGURA 71: Perfis radargramas aquisição depósito futuro. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.

A FIGURA 72 ilustra a bancada do depósito atual onde foi realizado a aquisição do perfil GPR6 e GPR6A, e alguns materiais contidos nesta bancada como fragmentos rochosos e dreno para captação do percolado.



FIGURA 72: Fotos de uma bancada no depósito atual (direita) e dreno captação de chorume, água pluvial e fragmentos rochosos.

Os perfis GPR6 e GPR6A, FIGURA 75 e 76, foram adquiridos sobre a bancada do depósito atual e através das interpretações dos refletores dos radargramas pode-se caracterizar duas camadas distintas:

(i) a primeira camada, entre 0,20 a 0,50 m de profundidade, comporta refletores horizontalizados, com baixa amplitude e com intermediária atenuação e refletem o material de recobrimento dos resíduos sólidos. Ainda nessa mesma camada observa-se um refletor com alta amplitude, na distância de 22 m, refletindo o dreno de captação do percolado (FIGURA 73).

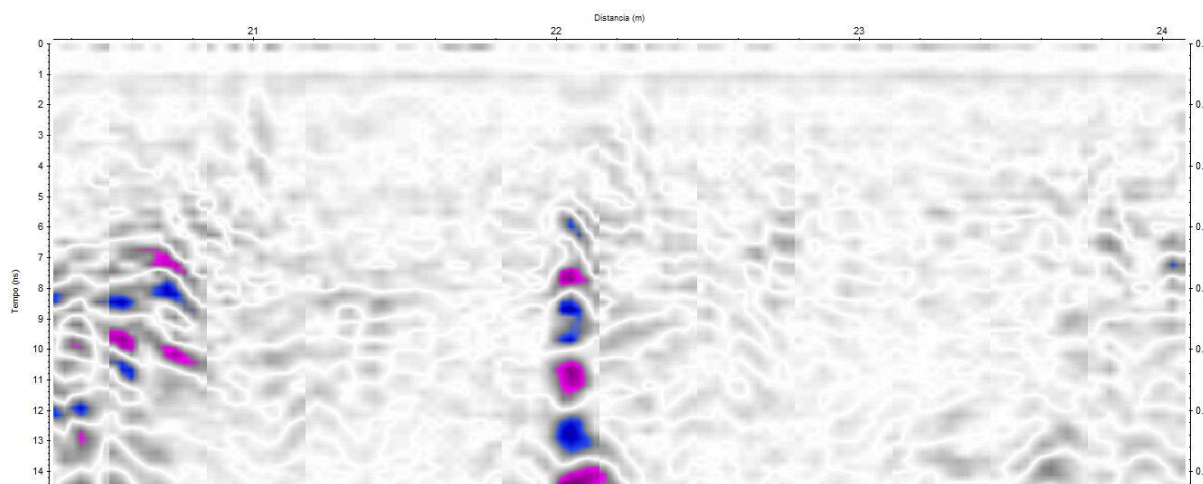


FIGURA 73: Imagem ilustra o refletores associados a camada de recobrimento e ao dreno.

(ii) a segunda camada, entre a distância de 0,5 a 1m, é composta por refletores distintos os quais foram caracterizados por apresentarem: baixas a altas amplitudes, horizontalizados e heterogêneos, e às vezes tornam-se atenuados, conforme FIGURA 74. Os quais foram associados a camada de resíduos sólidos, que se mencionados foram associados aos resíduos sólidos compactados, contudo, o reflexo do percolado provavelmente está exemplificado pelos refletores atenuados.

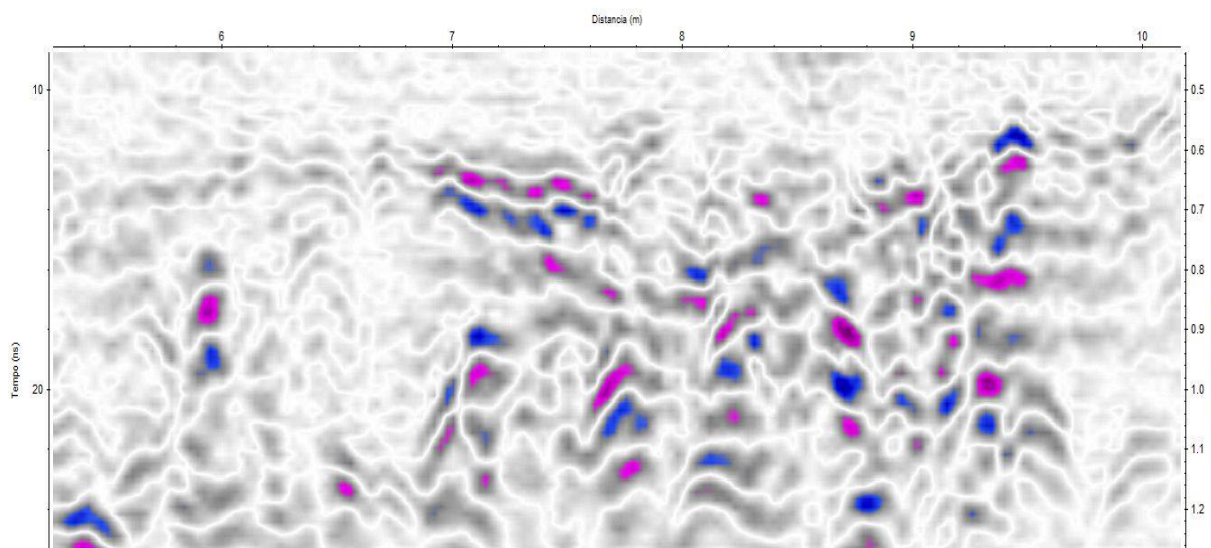


FIGURA 74: Refletores ilustrando o possível resíduo sólido.

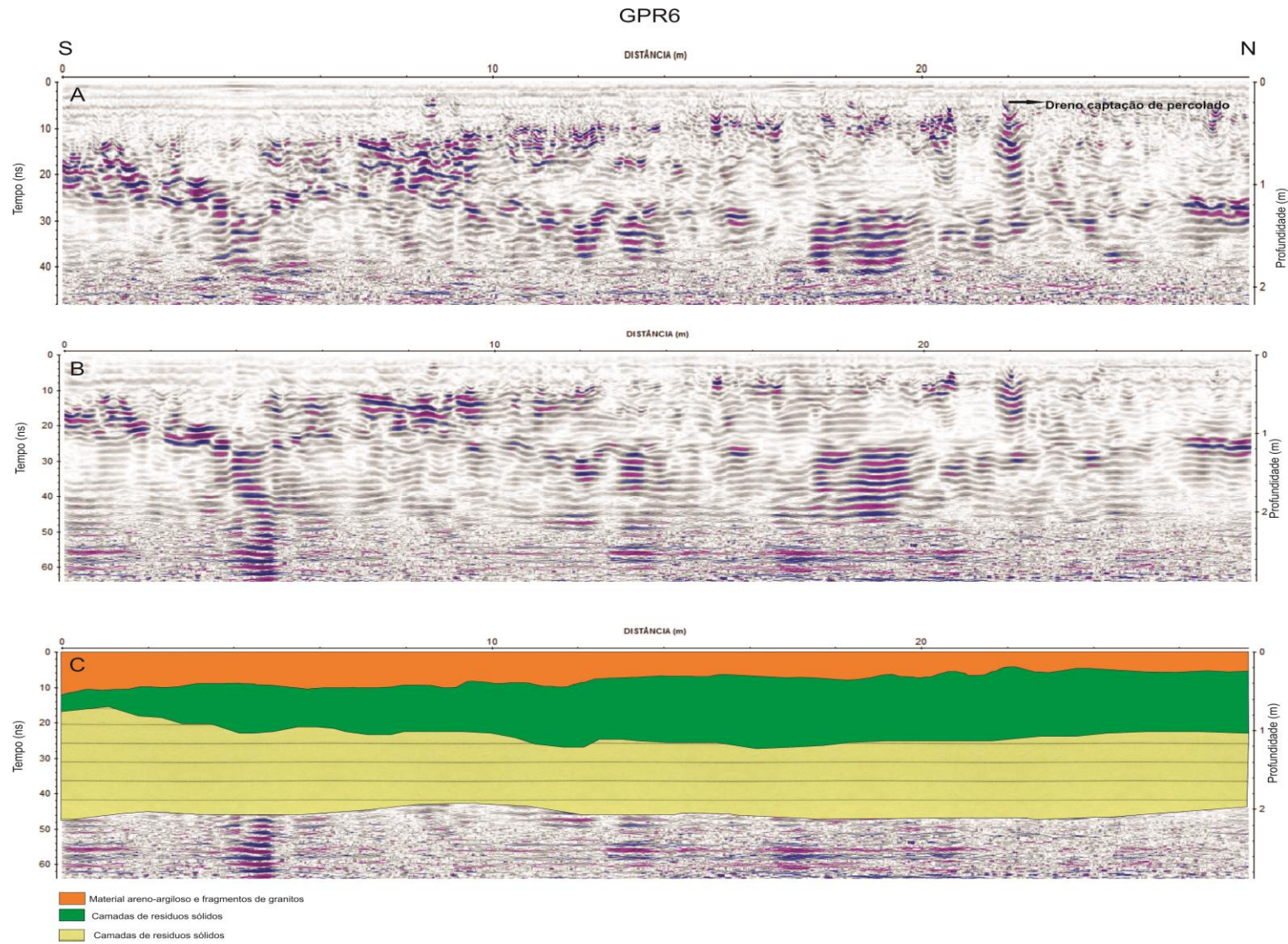


FIGURA 75: Perfis radargramas aquisição depósito atual. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.

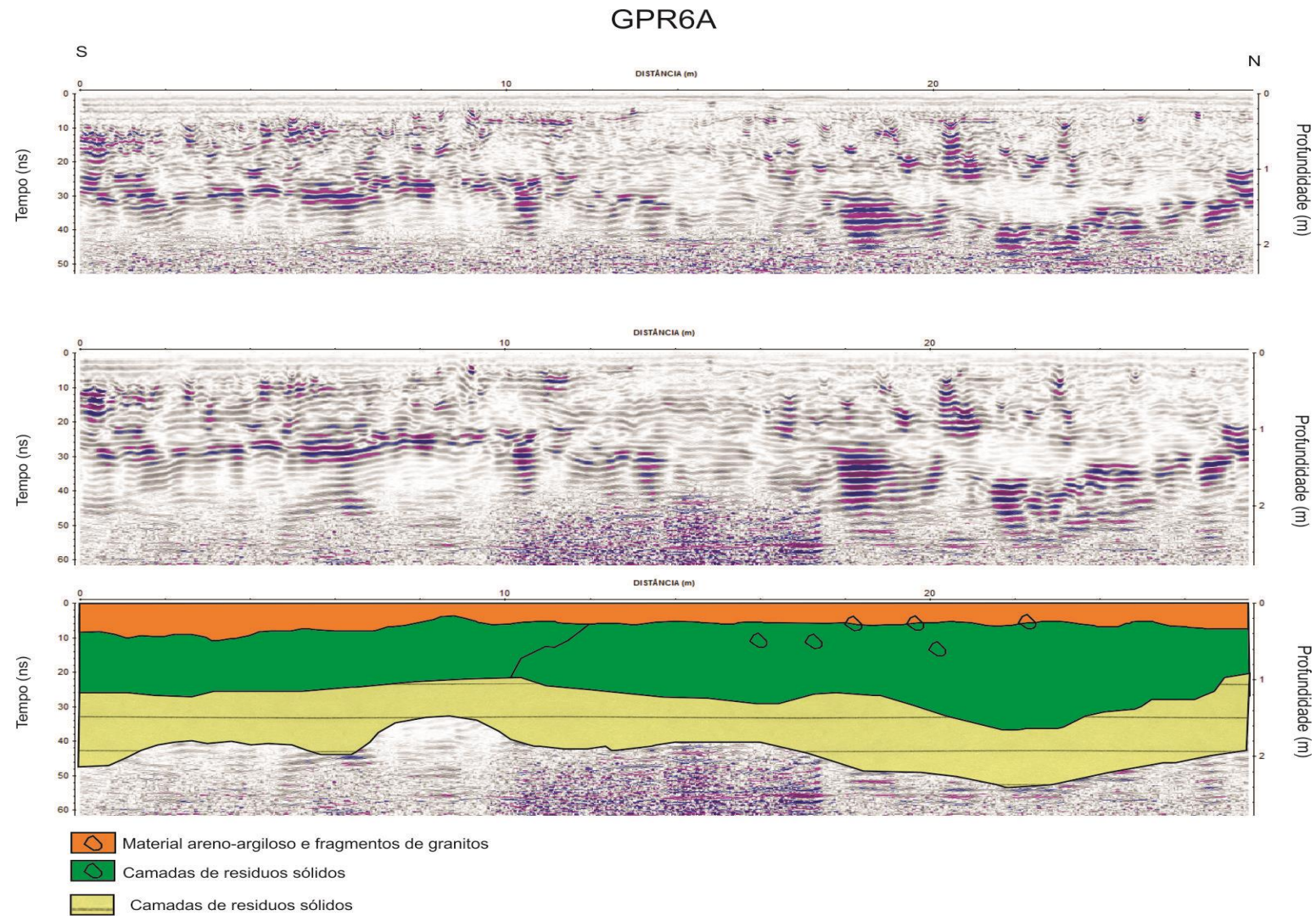


FIGURA 76: Perfis radargramas aquisição depósito futuro. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.

A FIGURA 77 ilustra a região oeste do aterro do aterro de Guaratuba, na qual evidencia a extração dos granitos e a retirada do saibro (areno-argiloso) usado para recobrimento e construção do aterro. Estes materiais foram interpretados no perfil GPR1.



FIGURA 77: Contato do granito com o material solo areno-siltico-argiloso.

No radargrama GPR1, FIGURA 78, obteve como respostas os refletores duas camadas distintas: (i) a primeira: camada possui refletores com baixa a intermediária amplitude, dispersos e não contínuos, são evidenciados até 0,80 m de profundidade no início do perfil e na porção central do perfil em maiores profundidades refletindo um solo areno-argiloso. Na porção NW do perfil, nas profundidades superiores a 1 m, são observados refletores com alta amplitude e não horizontalizados, os quais foram associados aos granitos ou regolitos existente em meio ao solo. Já na porção SE, os refletores observados possuem intermediárias amplitudes, às vezes se tornam atenuados e dispersos, e também, refletem os granitos/regolitos em meio a um material areno-siltico-argiloso, conforme mostrado na figura 78.

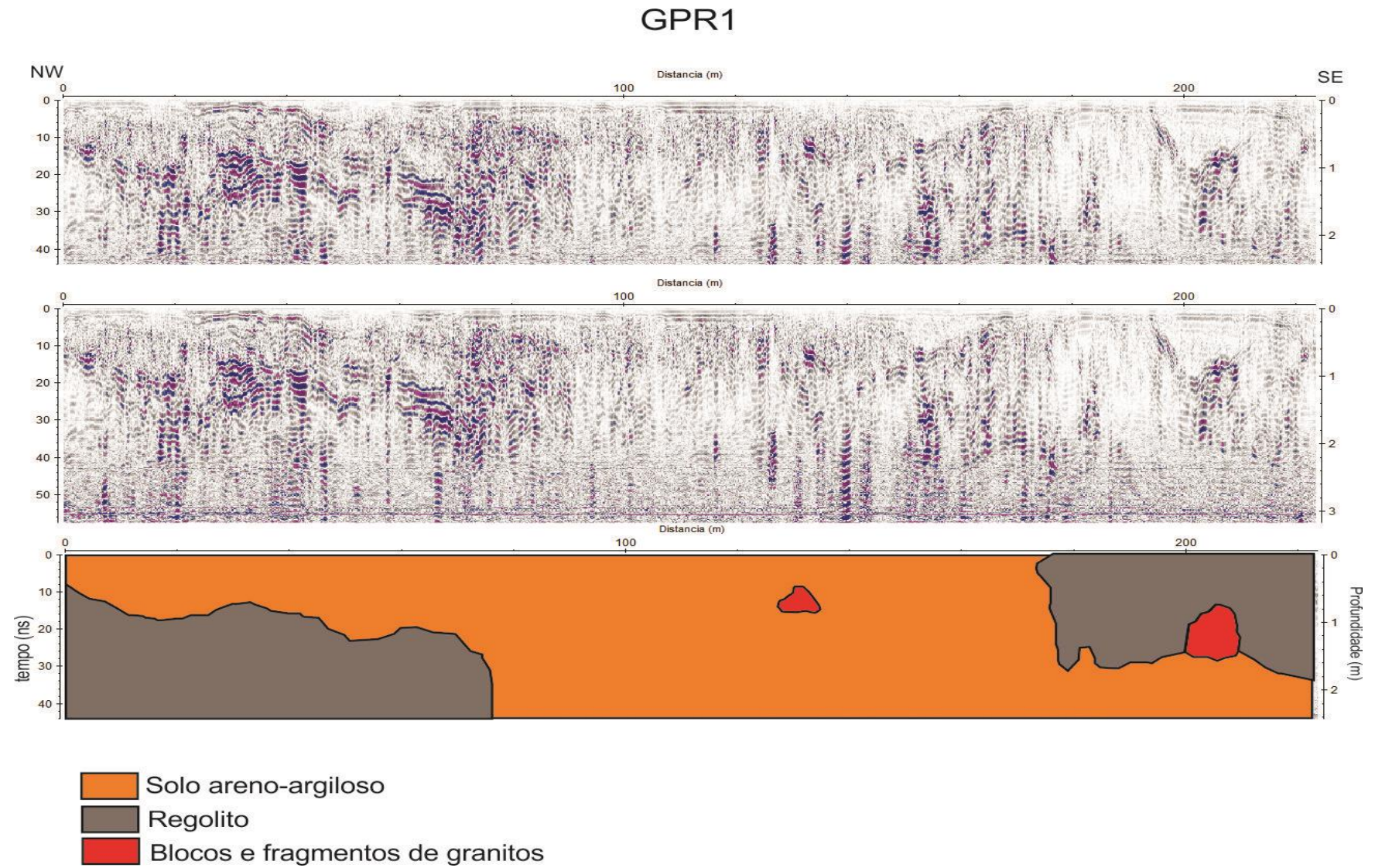


FIGURA 78: Perfil radargrama aquisição área adjacente ao aterro atual. A) Antena de 700 MHz; B) Antena de 250 MHz; C) Interpretação na antena de 700 MHz.

7. Conclusões

A utilização do V.A.N.T foi de fundamental importância para obtenção de imagens aéreas com alta resolução e qualidade para área de estudo, haja vista a baixa qualidade das imagens do Google Earth na época do levantamento. A aquisição destas imagens pode auxiliar no monitoramento espacial e no geoprocessamento da área investigada ou pesquisada.

O desempenho do método da eletrorresistividade, arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=20m$) e da sondagem elétrica vertical (SEV), foi considerado eficiente na delimitação lateral e vertical da pluma de contaminação no aterro sanitário atual. Tais respostas elétricas também mostraram claramente o contraste entre os depósitos atual e futuro. Em adição foi possível caracterizar o substrato granítico, seu regolito e os sedimentos da planície costeira. Considerando que não há uma separação prévia dos resíduos sólidos, os resultados com altos valores de cargabilidades, obtidos pelo método da polarização, no interior do depósito são influenciados pelos resíduos metálicos.

Através da correlação dos resultados obtidos entre os perfis, elétricos e o EM34-3, pode-se diagnosticar indiretamente áreas possivelmente contaminadas ($<50 \text{ Ohm.m}$ e $> 20 \text{ mS/m}$), suspeitas de contaminação ($50-70 \text{ Ohm.m}$ e $15-20 \text{ mS/m}$) e não contaminadas ($>70 \text{ Ohm.m}$ e $<15 \text{ mS/m}$). Em virtude do que foi mencionado percebe-se que as porções a nordeste e norte do depósito atual possuem maiores risco de contaminação.

O método *ground penetrating radar* mostrou-se eficiente para identificação de estruturas rasas, como os drenos e a geomembrana, e os resíduos sólidos investigados no depósito atual. Levando-se em consideração aspectos como terrenos irregulares, presença de fragmentos rochosos, o equipamento Detector Duo, mostrou-se limitado para aquisição dos perfis.

Tendo em vista os aspectos observados conclui-se que os métodos elétricos, são os mais eficazes para investigações de cunho ambiental, e podem enriquecer futuras perícias ou laudos expedidos pelo Departamento de Polícia Federal do Paraná.

Em vista dos argumentos apresentados sugere-se que monitoramentos geofísicos, análises químicas das águas subterrâneas, de sedimentos e solos sejam

realizadas no entorno do aterro sanitário. Em adição, para futuras pesquisas recomendam-se levantamentos elétrico e eletromagnético (EM34-3) com espaçamentos iguais e diferentes ao usado nesta pesquisa para serem comparados, a utilização de GPR com antenas de 100 e 50 MHz, bem como as análises citadas anteriormente.

8. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>>. Acesso em: 11/9/2014.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos-Classificação. Rio de Janeiro, 2014.

ANNAN, A. P. Ground penetration radar workshop notes. Sensors & Software. Inc. Internal Report. 130p. 1996

ANNAN, A. P. GPR- History, Trends, and future Developments. Subsurface Sensing Technologies and Applications, vol.3, nº 4, October 2002.

ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors & Software. Inc. Mississauga, Ontário, Canadá. 1997p. 2001.

BICHO, C. P. **Projeto μ VANT - uma parceria DNPM/UNB para desenvolvimento e uso de μ VANTs na fiscalização de atividades minerais não tituladas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORAMENTO REMOTO, XVI., 2013, Foz do Iguaçu.

BEVAN, B.W. The search for graves. Geophysics, vol.56, nº 9, pg. 1310-1319. September 1991.

BLUM, L. M Crimes Ambientais. REVISTA PERÍCIA FEDERAL. Brasília: Associação Nacional dos Peritos Criminais Federais, anoVIII, n.5, set. /maio., 2006/2007.

BORTOLIN, J. R. M; MALAGUTTI. F. W. Monitoramento temporal da pluma de contaminação em aterro controlado, na cidade de Rio Claro-SP, por meio do método eletrorresistividade. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 11., 2009, Salvador.

BORGES, R. W. **Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade**. 127p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) -Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2002.

BORGES, R. W **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. 256p. Tese de Doutorado, Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP. 2007.

BOSCOV M.E.G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Texto, 248p. 2008

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 ago. Seção 1, p.3.

BRASIL. Resolução CONAMA n.396, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 7 abr. Seção 1, p.64-68.

BRASIL. Portaria MS n. 2914, de 12 de dezembro de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 14 dez. Seção 1, p.

CAVALCANTI, M. M. **Aplicação de métodos geolétricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do aterro controlado do Jokey Clube de Brasília**.86p. Dissertação (Mestrado em Geofísica), Universidade de Brasília, 2013.

COSTA, A. F.; MALAGUTTI. F. W. Aplicação de sondagens elétricas verticais no estudo da contaminação no lixão de Porto Velho – RO. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 11., 2009,Salvador.

CONTRERA, R. C. **Tratamento de lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbios e aeróbios operados em bateladas sequenciais**. 789p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, 2008.

DANIELS, J. J. **Fundamentals of ground penetrating radar**. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 2. Golden. In. Proceedings., Golden: SAGEEP'89, 62 -142p. 1989.

DAVIS, J. L.; ANNAN. A. P. Ground Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, n° 37, pg 531-551.1989.

DENTITH M.; MUDGE S. T.; **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge University Press, New York, USA. 516p. 2014.

EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, Vol 42 (3), p. 1020 – 1036. 1977.

ELIS, V. R & ZUQUETTE , L. V. Caminhamento elétrico dipolo-dipolo- Uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro. ABGE. p. 39-49. 1996.

ELIS, V. R. **Avaliação da Aplicabilidade de Métodos Elétricos de Prospeção Geofísica no Estudo de Áreas utilizadas para Disposição de Resíduos**. 1999. Dissertação de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, São Paulo. Brasil. 1999.

FACHIN, S. J. S. **Ensaio geolétricos 2D do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do**

problema. 142p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2007.

FERREIRA, F. J. F. **Técnicas e Aplicações de Imageamentos Elétricos 2D e 3D. Métodos Elétricos.** Curso de Pós Graduação em Geologia. Disciplina Geofísica Exploratória. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 69p. 2002.

GALLAS, J.D.; TAIOLI, F.; SILVA, S.M.C.P.; COELHO, O. G.W.; PAIM, P.S.G. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. Revista Brasileira de Geofísica, n 23, p. 51-59. 2005.

GALVÃO, T. D. L.; PORSANI, M.J. Aplicação do método da eletrorresistividade para determinação da contaminação em depósito de lixo do município de Alcobaça – BA. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 2., 2011, São Paulo.

GANDOLFO, O.C.B.; **Aplicação da sísmica de reflexão de alta resolução e do radar de penetração no solo (GPR): Um estudo comparativo.** 140p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1999.

GANDOLFO, O. C. B; GALLAS, J.D.F. Resistividade 2D – Profundidade de investigação e resolução do objeto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 2006, NATAL. SBGF. Rio de Janeiro, 2006.

GIORDANO, G; BARBOSA FILHO, O. CARVALHO, R. J. Processos físico-químicos para tratamento do chorume de aterros de resíduos sólidos urbanos. Série Temática: Tecnologias Ambientais – volume 4. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, 178p. 2011

GÓIS, R.J. **Relatório Final de Pesquisa.** Curitiba:DNPM,1997. 29 p. Relatório técnico.

HULSEMBECK & C.O German patente nº489434. In: REYNOLDS, J. M. **An Introduction to applied and environmental geophysics.** John Wiley & Sons Ltda., New York, USA, 796p. 2003.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Relatório da situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos no estado do Paraná 2012.** Paraná, 2012. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Diagnostico_RSU_2012_VERSAO_FINALcom.MAPAS.pdf>. Acesso em: 23/03/2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo, 1995. 277p.

INSTITUTO AGRONômICO DO PARANÁ - IAPAR. CARTAS CLIMÁTICAS DO PARANÁ. <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo>>. Acesso em 09/05/2013.

KAHWAGE, A.M; CORREA, L.E.; BORGES FILHO.F.W.; ORTEGA.R.; MAGALHAES, C. Atenuações do sinal de GPR 3D aplicadas a identificação de solo contaminado por hidrocarbonetos - Estudo de caso. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 11., 2005,Salvador.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina do Texto, 438p. 2009.

KELLER. V. G., 1987. Rock and mineral properties. Investigations in Geophysics nº3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol.1,p.13-51.

JOL, H.M. Ground Penetrating Radar: **Theory and Applications**. Elsevier Science, Oxford.. 402p. 2009.

LOKE, M.H. Res 2Dinv versão 3.54 for windowns 98/Me/200/NT/XP. Rapid 2D Resistivity and IP Inversion using the least – square method. Softyware manual. 133p. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, 2001. <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/et000017.pdf>>. Acesso em: 29/01/2015.

MCNEIL, J.D. Electrical Conductivity of Soils and Rocks, Technical note TN-5. GEONICS LIMITED. Mississauga. Canadá. 20p. 1980.

MILLER, P.S. Disturbances in the soil: Finding buried bodies and other evidence using ground penetrating radar. In: Ruffell, A. & McKinley, J. **Geoforensics**. Wiley & Sons, Hardback, 312 p, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO MEIO AMBIENTE (MMA). Política de resíduos sólidos apresenta resultados em 4 anos, 2014. <http://www.mma.gov.br/informma/item/10272-pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos-apresenta-resultados-em-4-anos>>. Acesso em: 29/09/2014.

MINERAIS DO PARANÁ (MINEROPAR). Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná.Curitiba,2006.Disponívelem:<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/Geomorfologicos/atlas_geomorforlogico.pdf>. Acesso em: 29/8/2013.

MOREIRA, C. A; BRAGA, A. C. O. Determinação de resíduos sólidos domiciliares e variações na resistividade e cargabilidade. Revista Brasileira de Geofísica n 27, p. 401-409. 2009

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. Geologia de engenharia. ABGE, 586 p. 1998

OLHOFET, G. R. Eletrical magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In: BORGES,R.W. **Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e**

Eletorresistividade.127p. Dissertação (Mestrado em Geofísica)-Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2002.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua.** Ed. Paraninfo, Biblioteca técnica Philips, Madrid. 523p. 1972.

PARANÁ. Minerais do Paraná. **MINEROPAR- Paraná:** Mapa geológico Folha de Curitiba. 2006. Escala: 1:250000.

PARASNIS, D.S. **Principles of applied geophysics.** Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK. 429p. 1997.

PORSANI, J. L. Contribuições do GPR em Geociências, planejamento urbano e arqueologia.186p. Tese (Doutorado em Geofísica)-Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2009.

PREUSSLER, K. H. Avaliação da eficiência de uma área alagável natural adotada no aterro sanitário de Guaratuba, PR, Brasil, para pós tratamento de chorume.139p. Dissertação (mestrado profissional em gestão ambiental). UNICEMP, 2008.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to applied and environmental geophysics.** John Wiley & Sons Ltda., New York, USA, 796p. 2003.

SALVADOR, F. A. S. (mensagem de trabalho) recebida em 28/01/2015.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS AMBIENTAL (SEMA). **Plano de manejo da área de proteção ambiental de Guaratuba.** Paraná, 2006. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Plano_de_Manejo/APA_Guaratuba/Plano_de_Manejo_APA_de_Guaratuba.pdf> . Acesso em: 24/06/2014.

SILVA, J.E; YOKOYAMA, L. M.; BORGES, W. R.; ELIS, V. R; HODO, F. Y. Mapeamento Tridimensional de Pluma de Contaminação Através de Resistividade Elétrica. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 10., Rio de Janeiro. **Anais...** SBGF, 2007. v. CD-Rom.

SHARMA, P. V. **Environmental and engineering geophysics.** Cambridge University Press, New York, USA. p. 475, 1997.

SHERIFF, R, E. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Third Edition, 384p. 1999.

SANTOS, F. M.; **Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuiabá-MT.**101p. Dissertação (Física e Meio Ambiente). Universidade Federal do Mato Grosso, 2005.

STEVANATO, R.; FERREIRA, F.J.F.; PEGORARO, M.; Imageamento elétrico 2D e polarização induzida na detecção de pluma de contaminação no aterro sanitário de Itajaí-SC. In: International Congress of The Brazilian Geophysical Society, 2003.

STEVANATO, R.; FERREIRA, F.J.F. Imageamento elétrico 2D nos depósitos atual e futuro de resíduos sólidos do Município de Manguerinha-PR. In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, 2013.

STEVANATO, R.; FERREIRA, F.J.F. CANATA, R. Imageamento elétrico 2D no aterro sanitário de Lages-SC. In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2014.

STRONGMAN, K.B., 1992. Forensic applications of ground penetrating radar. In: Pilon, J. (ed). *Ground Penetrating Radar*. Geological Survey of Canada, Paper 90-4, 203–211.

TELFORD, W. M.; GELDART, P.L.; SHERRIF, R. E. **Applied geophysics**. Cambridge University Press, New York, USA. Second edition. p.792. 1990.

TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H. & VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. Macgraw Hill, Book Co., Inc., New York, 979 p. 1993.

USTRA, A. T. **Utilização dos métodos eletroresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru-SP**. 205p. Dissertação de Mestrado, Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP. 2008.

VANHONI, F.; MENDONCA, F. A. 2008. O Clima no litoral do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.3/4, p. 49-64, 2008.

XAVIER, F. F; BERKENBROCK, P. E. Mapeamento geoelétrico no aterro sanitário do município de Blumenau-SC. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 11. 2005, Florianópolis.

WARD, O. S. H., 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, p. 147-189.

ANEXOS

Anexo 1: Mapa de localização das sondagens.....	134.
Anexo 2: Descrição das sondagens.....	135.
Anexo 3: Mapas de isocargabilidades.....	163.

ANEXO 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS

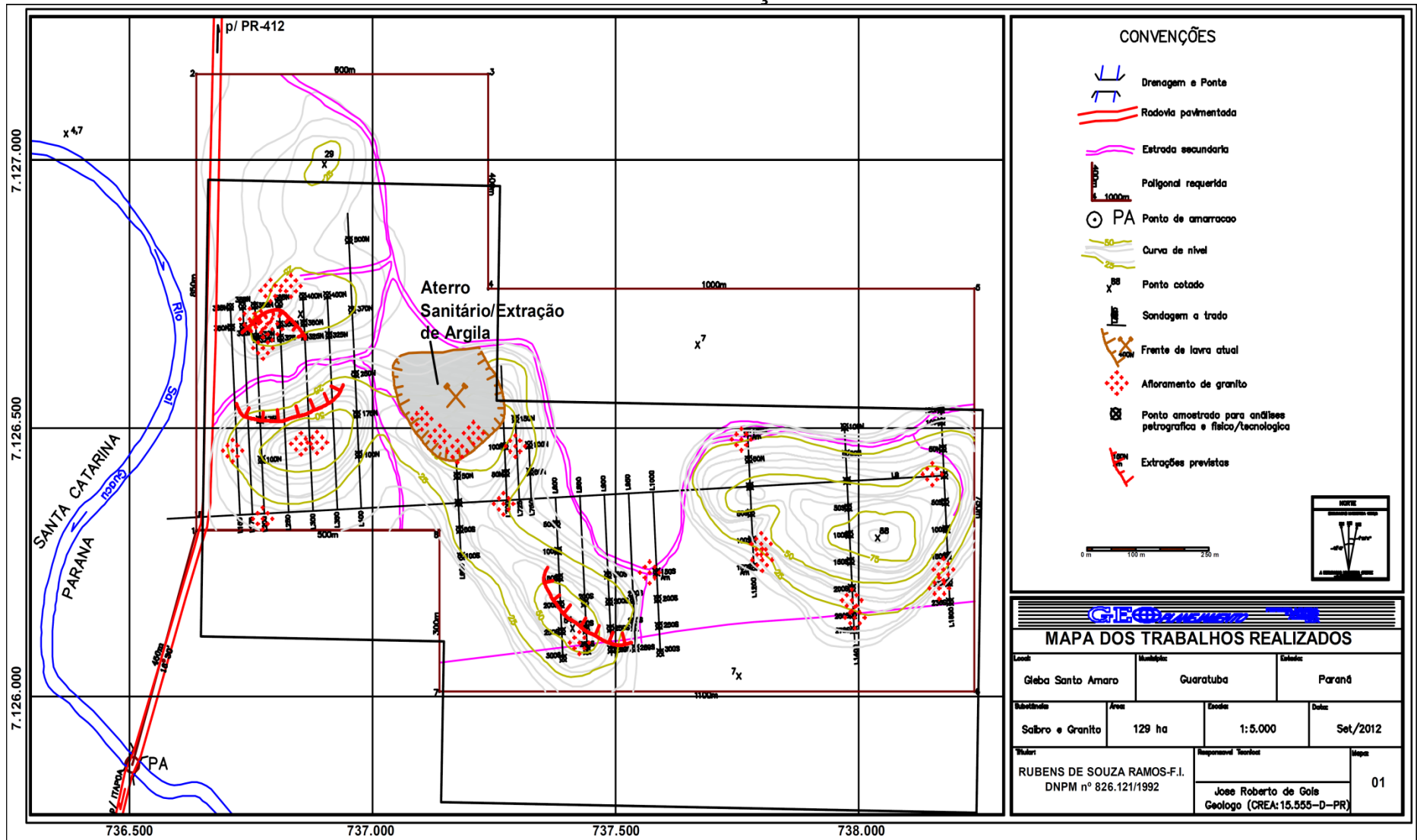


FIGURA 79: Mapa de localização das sondagens (GÓIS, 1997).

ANEXO 2- DESCRIÇÃO DE SONDAGENS

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº L600-LB
Intervalo (m)	Descrição	
0.0-0.05	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltico-arenoso, com restos vegetais.	
0.05-1.5	horizonte B; solo marrom claro, siltoso, friável, transicional para horizonte C alaranjado, argiloso, com fragmentos quartzo-feldspáticos (granito alterado)	
1.5	material impenetrável ao trado (bed-rock)	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº L600-50N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.02	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltico-arenoso, com restos de raízes.	
0.02-0.8	horizonte B; solo marrom claro, silto-argiloso, pouco plástico, bastante compacto, com raros granulos de quartzo.	
0.8-5.0	horizonte B; solo vermelho, silto-argiloso, pouco plástico, bastante compacto, com raros grânulos de quartzo.	
5.0-8.5	horizonte C; material róseo-avermelhado, bastante friável, siltico, muito bem drenado, com fragmentos de feldspato + quartzo e micas preservadas. Preserva ainda estruturas da rocha original.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST n ^o L600-50S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.25	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltico-arenoso, com restos de raízes.	
0.25-2.0	horizonte B; solo marrom claro, siltoso, pouco plástico, bastante compacto, pouco quartzo. Em profundidade passa a róseo-avermelhado.	
2.0-2.2	horizonte C; material friável, cor amarelada, com fragmentos de feldspato mais mica. difícil recuperação.	
2.2	sem recuperação (impenetrável ao trado)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST n ^o L600-100S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.12	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.12-3.5	horizonte B; solo marrom claro, com tons avermelhados, muito plástico, argilo-siltoso com pouco quartzo.	
3.5-4.4	horizonte B; solo róseo-avermelhado, compacto, siltoso, com raros grânulos de quartzo.	
4.4-4.5	horizonte C; regolito granitóide, com coloração amarela clara a branca, com minerais primários' preservar. Impenetrável a partir de 4.5 m.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L800-50S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.6	Areia fina cor branco-acinzentada, bem selecionada.	
0.6-1.7	argila cinza, plasticidade moderada, com baixa proporção de areia fina.	
1.7-3.5	areia fina siltosa, cor ocre-amarela, granulometria fina à média. No final do intervalo passa a areia fina a média, cor branca . lençol atingido em 3.0 m, com recuperação difícil. Furo interrompido.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L800-100S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.14	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltico-arenoso, com restos de raízes.	
0.14-3.9	horizonte B; solo marrom claro a amarelado, siltoso, compacto, pouco plástico, com raros grânulos de quartzo. A partir de 2.70 m o material adquire cor vermelha.	
3.9-8.5	horizonte C; material róseo-avermelhado com mica e feldspato, siltoso, friável, com estruturas preservadas.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L800-150S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.28	horizonte A ; solo cinza, siltoso, com restos de raízes.	
0.28-2.90	solo marrom claro com tons amarelados a alaranjados, fortemente compacto, areno-siltoso. A partir de 2.0 m torna-se vermelho e friável.	
2.90-8.5	horizonte C; material cor rósea, friável, com restos de feldspato e quartzo preservados (regolito granítico)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L800-200S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A ; solo marrom escuro, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.2-0.3	horizonte b: solo marrom claro passando a avermelhado, compacto, plasticidade média, com grânulos de quartzo.	
0.3-7.5	horizonte C; material róseo-avermelhado de alteração de granito, friável, pouco plástico, com minerais primários preservados.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L800-250S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.2-1.1	horizonte B; solo marrom claro, argilo-siltoso, compacto, pouco plástico, com raros grânulos de quartzo.	
1.1	impenetrável ao trado (atingido rocha)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L800-300S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.12	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.12-2.4	horizonte B; solo marrom claro, argilo-siltoso, compacto, pouco plástico, com grânulos de quartzo. A partir de 0.30 m transiciona para cor vermelha até o final do intervalo.	
2.4-3.8	horizonte C; material arenoso, friável, com minerais primários preservados, coloração avermelhada. Em 3,5 m inicia nível de cor rósea-avermelhada.	
3.8	impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1000-150S
Intervalo	Descrição	
	blocos e matacões de granito aflorando próximo em antiga lavra de pedra marroada.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1000-200S
Intervalo	Descrição	
	blocos e matacões de granito aflorando em continuidade aos afloramentos do ponto anterior. Próximo à estrada no caminho do Lixão.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1000-250S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.3	horizonte A ; solo marrom escuro, siltoso, com restos de raízes e matéria orgânica não discernível.	
0.3-1.50	horizonte B; solo marrom claro, argilo-siltoso, compacto, plasticidade média, com grânulos de quartzo e, mais raramente de feldspato. (possível solo coluvial). A partir de 1.5 m ocorre material impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1000-300S
Intervalo	Descrição	
0.00-0.18	horizonte A ; solo marrom escuro, siltoso, com restos de raízes e matéria orgânica não discernível.	
0.18-0.38	horizonte B; solo marrom claro, argilo-siltoso, plástico, úmido.	
0.38-1.40	argila marrom/alaranjada, plástica, com grânulos de quartzo.	
1.4-2.11	nível argilo-arenoso, cor cinza-escura, homogênea.	
2.11	material impenetrável (rocha)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1200-100N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.12	horizonte A ; solo cinza a preto, areno-siltoso, com raros grânulos de quartzo. Apresenta restos de raízes.	
0.12-0.22	horizonte B (?); solo argiloso cor amarelo ocre, úmido, argiloso, compacto, com granulos de quartzo.	
0.22-1.2	horizonte c (?); material mosqueado vermelho/marrom/amarelo, argilo-siltoso, com fragmentos de rocha.	
1.2	impenetrável (rocha)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1200-50N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.15	horizonte A ; solo marrom escuro, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.15-3.10	horizonte B; solo marrom avermelhado, siltoso, friável, com grânulos de quartzo.	
3.10-4.3	horizonte C; material avermelhado, friável, pouco plástico, raro quartzo, micáceo.	
4.3	ocorrência de blocos de quartzo (impenetrável)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1200-LB
Intervalo	Descrição	
0.0-0.19	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.19-2.7	horizonte B; solo marrom a avermelhado, silto-arenoso, compacto, com grânulos de quartzo.	
2.7-6.0	horizonte C; solo marrom avermelhado, siltoso, compacto, pouca plasticidade, micáceo. Em 5,0 m inicia-se granito alterado com estruturas preservadas e em 6,0 m o material torna-se impenetrável.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1200-50S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.22	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.22-2.90	horizonte B; solo marrom claro siltoso, muito compacto, com pouco quartzo. Em 2.2 m torna-se cor vermelha intensa, extremamente compacto, com grânulos milimétricos, de aspecto leitoso. Em 2.5 m ocorrem fragmentos de quartzo.	
2.9-3.75	horizonte C; material heterogêneo com fragmentos de granito e quartzo intercalados com níveis siltsosos vermelhos bastante micáceos.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1200-100S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.22	horizonte A ; solo marrom escuro, siltiloso, friável, com restos de raízes.	
0.22-3.45	horizonte B; solo siltiloso, marrom avermelhado, compacto, com grânulos de quartzo. Nos últimos 0,8 m predomina cor vermelha.	
3.45	blocos de quartzo (impenetrável)	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1200-150S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltiloso, friável, com restos de raízes.	
0.20-2.70	horizonte B ; solo siltiloso marrom claro a amarelado, compacto, pouco plástico, com pouco quartzo. Em 2.5 m o solo torna-se vermelho associado a fragmentos de veio de quartzo.	
2.7-3.2	horizonte C; material de alteração do granito, composto por fragmentos de quartzo-feldspato e mica. Em 3.2 m atingem rocha (impenetrável)	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1400-50N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, areno-siltoso, friável/poroso, com restos de raízes.	
0.2-3.0	horizonte B ; solo marrom claro /amarelado, compacto, argilo-siltoso, com grânulos de quartzo. Passa a avermelhado em 1.8 m.	
3.0-3.2	nível pegmatóide formado por quartzo + feldspato e cristais de biotita centimétricas , em placas.	
3.2-4.5	regolito granítico, róseo, a base de quartzo + feldspato, tornando-se impenetrável ao trado em 4.5.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1400-LB
Intervalo	Descrição	
0.0-0.18	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, friável, com restos de raízes.	
0.18-4.0	horizonte B; solo marrom avermelhado a vermelho, argilo-siltoso, compacto, pouco plástico e com grânulos de quartzo, bastante homogênea.	
4.0-4.5	horizonte C; material vermelho, siltosos, micáceo, friável	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1400-100N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.1	horizonte O	
0.1-0.2	horizonte A ; solo marrom escuro, areno-argiloso, moderadamente plástico	
0.2-2.0	areia média a fina, cor cinza, matriz caulítica, constituídas por grânulos arredondados de quartzo.	
2.0-2.4	areia fina a média, cor bege, constituída por quartzo e feldspato.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1400-50S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.1	horizonte O	
0.1-0.7	horizonte A ; solo marrom escuro a preto, siltoso, pegajoso, com restos de raízes.	
0.7-3.7	horizonte B; solo castanho avermelhado, areno-argiloso, bastante plástico, pegajoso, bastante compacto, presença de quartzo.	
3.7-4.0	horizonte C; material de cor bege a castanho, argilo-arenoso, constituída por grãos de quartzo e biotita	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1400-100S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.1	horizonte O	
0.1-0.47	horizonte A ; solo marrom claro, areno-argiloso, pouco plástico.	
0.47-2.6	horizonte B; solo marrom avermelhado, areno-argiloso, plástico, pegajoso, compacto, com presença de quartzo.	
2.6-3.15	horizonte C; regolito granítico, impenetrável ao trado em 3.15 m.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1400-150S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte O	
0.05-0.1	horizonte A ; solo marrom claro, areno-argiloso, pouco plástico, com raízes.	
0.1-2.7	horizonte B; solo marrom claro, areno argiloso, plástico, pegajoso, presença de quartzo e concentrações de minerais escuros.	
2.7-3.15	Horizonte C; material marrom claro, argilo-arenoso, pulverulento, compacto. Em 3.0 m material de cor bege, arenoso, friável, compacto, com quartzo, feldspato.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1400-200S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte O	
0.05-0.15	horizonte A ; solo marrom claro, areno-argiloso, pouco plástico, com raízes.	
0.15-0.35	horizonte B; afloramento de rocha em 0,35 m (impenetrável)	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L1400-205S
Intervalo	Descrição	
0.00-0.05	horizonte O	
0.05-0.25	horizonte A ; solo marrom claro, siltico-argiloso, plástico, com raízes.	
0.25-1.05	horizonte B; solo de cor vermelho-castanho, siltico-argiloso, com fragmentos de rocha, impenetrável ao trado em 1,05.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1400-250S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte O	
0.05-0.3	horizonte A ; solo castanho escuro a marrom, areno-argiloso, pouco plástico, com raízes.	
0.3-1.9	horizonte B; solo vermelho acastanhado, areno-argiloso, bastante plástico, pegajoso.	
1.9-2.7	horizonte C solo marrom claro, areno-argiloso, pulverulento, extremamente plástico, com fragmentos de rocha alterada.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1400-278S
Intervalo	Descrição	
	afloramento de rocha	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1400-275S
Intervalo	Descrição	
	<p>Amostrados:</p> <p>a) Blocos e laje de rocha;</p> <p>b) Bloco solto, com veio de quartzo associado;</p>	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-LB
Intervalo	Descrição	
0.0-0.15	horizonte O / horizonte A	
0.15-0.6	horizonte B; solo marrom claro, areno-argiloso, moderadamente plástico.	
0.6-1.4	horizonte B com fragmentos de rocha alterada. Em 1,4 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-03S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte O	
0.05-0.63	horizonte A; solo marrom claro, areno-argiloso, pouco plástico, friável, com raízes.	
0.63-1.45	horizonte B; solo vermelho, areno-argiloso.	
1.45-1.6	horizonte C; material regolítico castanho claro, mosqueado de bege; presença de quartzo e feldspato. Impenetrável em 1.6 m.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-50N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte O	
0.05-0.3	horizonte A; solo marrom claro, areno-argiloso, friável, com raízes.	
0.3-1.45	horizonte B; solo vermelho, areno-argiloso, pegajoso, com quartzo e fragmentos de rocha alterada. Em 1.45 impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-53N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte O	
0.05-0.3	horizonte A; solo marrom claro , areno-argiloso, friável, com raízes.	
0.3-1.6	horizonte B; solo vermelho, areno-argiloso, pegajoso, com quartzo e fragmentos de rocha alterada. Em 1.6 impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-100N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.3	Solo marrom escuro, com raízes, friável, siltico-argiloso.	
0.3	afloramento de rocha - gnaisse biotítico orientado com níveis preferenciais	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-123N
Intervalo	Descrição	
0.0-1.3	Banhado. Impenetrável ao trado em 1.3 m.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-50S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.4	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, siltico-argiloso.	
0.4-3.2	horizonte B; solo vermelho-castanho, areno-argiloso, bastante plástico, com quartzo e feldspato. Ocorrem horizontes com fragmentos de quartzo de veio. Em 3.2 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-100S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.35	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, plástico, siltico-argiloso.	
0.35-1.1	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, siltico-argiloso, plasticidade alta	
> 1.1	rocha (impenetrável ao trado)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-150S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.35	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, plástico, siltico-argiloso.	
0.35-1.0	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, siltico-argiloso, plasticidade alta	
> 1.0	rocha (impenetrável ao trado)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-200S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.35	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, plástico, siltico-argiloso.	
0.35-1.0	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, siltico-argiloso, plasticidade alta	
> 1.0	rocha (impenetrável ao trado)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L1600-236S
Intervalo	Descrição	
0.0-1.0	Várzea	
> 1.0	rocha (impenetrável ao trado)	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L850-289S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, plástico, pulverulento, siltico-argiloso.	
0.2-0.5	horizonte A+B; solo marrom claro, siltico-argiloso, plástico.	
0.5-3.0	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, argiloso, bastante plástico, pegajoso. a partir de 2,0 m ocorrência de fragmentos de rocha (parcialmente alterada). Aos 3.0 m rocha parcialmente alterada, impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L900-289S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.3	horizonte A; Solo marrom escuro, areno-siltico-argiloso , friável, compactidade baixa. com fragmentos de rocha pouco alterada.	
0.3-4.3	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, areno-silto-argiloso, plasticidade elevada, compacto, com quartzo e feldspato.	
4.3-4.5	horizonte C; material de cor vermelha mosqueada de bege e castanho, areno-siltico-argiloso, compacto, pulverulento com quartzo, feldspato e mica. estrutura de rocha preservada. em 4.5 m material de difícil recuperação (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L950-289S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.25	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, areno-argiloso.	
0.25-2.0	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, areno-siltico argiloso, bastante plástico, pegajoso, com fragmentos de rocha alterada, quartzo e feldspato.	
2.0-3.0	horizonte C; material castanho mosqueado de bege e cinza, argilo-arenoso, compacto, pulverulento. com quartzo, feldspato, micas e minerais máficos. Em 3.0 m material de difícil recuperação (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L900-250S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.3	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, areno-siltoso.	
0.3-2.0	horizonte B; solo vermelho a castanho claro, areno-siltico argiloso, bastante plástico, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
2.0-4.0	horizonte C; material vermelho a marrom, arenoso, pulverulento ao trado, estruturas de rocha preservadas, com quartzo, feldspatos parcialmente alterados e mica. Ocorrem concentrações de biotita. Em 3.5 m o material apresenta-se menos alterado e com cor vermelha intensa. Em 4.0 m material de difícil recuperação (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L900-250S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.3	horizonte A	
0.3-3.0	horizonte B; solo castanho claro a vermelho, areno-siltico argiloso, compacto, pegajoso, com quartzo e feldspato. Em 2.7 ocorrem micas dispersas, com estrutura de rocha preservada.	
3.0-5.5	horizonte C; material marrom a vermelho, arenoso, pulverulento. Em 5.5 m material de difícil recuperação (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L900-150S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.15	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, pulverulento, areno-siltoso.	
0.15-2.8	horizonte B; solo castanho-bege, areno-argiloso, pegajoso, plástico.	
2.8-5.9	horizonte C; solo de cor bege a castanho, compacto, úmido, plástico, pegajoso, com quartzo, feldspato. Em 5.5 m o material apresenta-se úmido.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L950-200S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.25	horizonte A; Solo marrom escuro, pulverulento, areno-siltico-argiloso, compacidade baixa.	
0.25-1.5	horizonte B; solo castanho-bege, areno-argiloso, compacto, pegajoso, úmido.	
1.5-3.0	solo vermelho-castanho, areno-argiloso, pegajoso, muito compacto, plástico.	
3.0-4.0	material de cor marrom escura a preta, compacto, pulverulento, argilo-arenoso. Com quartzo, feldspato e micas. Ao final do furo material de cor cinza, impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L850-200S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.25	horizonte A; Solo marrom escuro, pulverulento, areno-argiloso, compactidade baixa.	
0.25-3.0	horizonte B; solo castanho claro a vermelho, areno-siltico argiloso, compacto, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
3.0-4.0	horizonte C; material vermelho mosqueado de branco a bege, areno-argiloso, compacto, pouco pulverulento. Em 4.0 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L850-250S
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A; Solo marrom escuro, pulverulento, areno-argiloso, compactidade baixa.	
0.2-3.0	horizonte B; solo castanho claro a vermelho, areno-siltico argiloso, compacto, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
3.0-4.5	horizonte C; material vermelho mosqueado de branco a bege, areno-argiloso, compacto, pouco pulverulento. Em 4.5 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L950-250S
Intervalo	Descrição	
	Depósito de tálus	
> 3.0	regolito, impenetrável ao trado	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST n ^o 300-350N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte O	
0.2-0.35	horizonte A; Solo marrom escuro, pulverulento, areno-siltico-argiloso, compactidade baixa.	
0.35-1.2	horizonte B; solo marrom claro, areno-argiloso, pouco compacto, plástico, com quartzo e feldspato.	
1.2-2.0	regolito constituído por quartzo, feldspato, mica alterada. Em 2.0 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST n ^o 300-400N
Intervalo	Descrição	
0.0-1.1	regolito constituído por quartzo, feldspato, mica alterada. Em 1.1 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST n ^o 300-300N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.1	horizonte O	
0.1-0.3	horizonte A; Solo marrom escuro, pulverulento, areno-siltico-argiloso, compactidade baixa.	
0.3-0.6	material arenoso, constituído por quartzo, feldspato, máficos, friável.	
0.6-1.3	regolito vermelho a castanho. Em 1.3 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L350-350N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte O	
0.2-1.1	horizonte B	
>1.1	rocha, impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L300-325N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.25	horizonte A; Solo marrom escuro, plástico, pouco úmido, com raízes., siltico-argiloso, compacidade baixa.	
0.25-1.5	solo castanho a vermelho, mosqueado de branco, areno-argiloso, com quartzo e feldspatos.	
1.5-1.9	regolito vermelho claro	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L200-320
Intervalo	Descrição	
0.0-1.6	Regolito. Atingiu rocha em 1.6.	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº L150-350N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.17	horizonte A; Solo marrom escuro, muito plástico, com raízes., areno-siltico-argiloso.	
0.17-0.47	Material castanho claro, argilo-arenoso rico em feldspato e quartzo.	
0.47-2.5	Material cinza claro a castanho claro, argilo-arenoso , muito úmido, rico em feldspato e quartzo, além de minerais máficos. Encontrada água em 2.5 m, difícil recuperação.	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº L175-388N
Intervalo	Descrição	
0.0-2.7	Material cinza claro a castanho claro, argilo-arenoso , muito úmido, rico em feldspato e quartzo, além de minerais máficos.	
>2.7	regolito impenetrável	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº L175-350N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.15	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, areno-siltico-argiloso.	
0.15-2.3	horizonte B; solo castanho claro, areno-argiloso, compacto, pegajoso.	
2.3-3.2	horizonte C; material castanho mosqueado de branco, argilo-arenoso, com quartzo e feldspatos parcialmente alterados. Em 3.2 m material de difícil recuperação (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L200-388N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte O	
0.2-0.35	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, areno-siltico-argiloso.	
0.35-0.6	horizonte B; solo castanho claro a escuro, areno-argiloso, com quartzo e feldspatos parcialmente alterados.	
0.6-2.07	horizonte C; material bege a vermelho, argilo-arenoso, com quartzo e feldspatos parcialmente alterados. Em 2.07 m material de difícil recuperação (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº L150-388N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.9	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, areno-siltico-argiloso.	
>0.9	rocha sã em blocos (furo interrompido).	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº 350-400N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.15	horizonte O	
0.15-0.35	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, plástico, siltico-argiloso.	
0.35-1.2	horizonte B; solo castanho claro, areno-argiloso, plástico, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
1.2-2.0	horizonte C; material vermelho, areno-argiloso, pegajoso, plástico.	
2.0-3.3	material vermelho mosqueado de branco a bege, areno-argiloso. Em 3.3 m difícil penetração.	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº 350-325N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.1	horizonte O	
0.1-0.25	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, plástico, siltico-argiloso.	
0.25-1.1	horizonte B; solo castanho claro, areno-argiloso, plástico, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
> 1.1	rocha sã	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº 350-300N
Intervalo	Descrição	
> 1.5	Rocha Sã	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº 750-100N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.1	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, plástico, siltico-argiloso.	
0.1-3.0	horizonte B; solo castanho claro, areno-argiloso, plástico, compacto, muito plástico, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
3.0-5.0	horizonte C; material de cor vermelha, arenoso, pulverulento. Em 4.0 m o material possui cor vermelha mais intensa, mosqueada de branco.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº 700-50N
Intervalo	Descrição	
0.0-2.3	Material castanho claro, areno-silto-argiloso, plástico, plástico, pegajoso, com quartzo e feldspato.	
2.3-3.7	horizonte B; solo castanho a vermelho, areno-argiloso, plástico, compacto, pegajoso, com quartzo.	
3.7-7.0	Material castanho-bege, areno-argiloso, muito compacto, pegajoso, plástico, com estruturas de rocha preservadas. Em 4.5 m material mais compacto, vermelho. Em 7.0 m regolito impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº 750-50N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.05	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, plástico, areno-siltico-argiloso, moderadamente friável.	
0.05-1.1	solo castanho a vermelho, areno-argiloso, plástico, compacto, pegajoso. em 1.5 m este horizonte torna-se mais avermelhado e moderadamente mais friável.	
> 1.1	Rocha sã	

FICHA DE SONDAÇÃO A TRADO		ST nº 700-100N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.15	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, plástico, areno-siltico-argiloso, moderadamente friável.	
0.15-1.65	solo castanho a vermelho, areno-argiloso, plástico, compacto, pegajoso. em 1.5 m este horizonte torna-se mais avermelhado e moderadamente mais friável.	
1.65-1.7	regolito vermelho-bege, arenoso, friável, compacto. em 1.7 m impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº 725-150N
Intervalo	Descrição	
0.0-0.2	horizonte A; Solo marrom claro a castanho, com raízes, friável, plástico, areno-argiloso, friável, pouco compacto.	
0.2-3.0	Solo castanho a vermelho, areno-silto-argiloso, pegajoso, compacto, plástico.	
3.0-3.65	horizonte C; material avermelhado, pulverulento, compacto, moderado, argilo-arenoso. Em 3.5 m regolito de cor bege impenetrável.	

FICHA DE SONDAGEM A TRADO		ST nº L400-175N
Intervalo (m)	Descrição	
0,00 - 0,12	Horizonte "O"	
0,12 - 0,37	Horizonte "A": solo castanho escuro, areno-argiloso com raízes, estrutura fraca	
0,37 - 2,30	Horizonte "B": solo castanho-claro, areno-argiloso, estrutura forte, compacidade moderada (pegajoso ao trado).	
2,30 - 8,70	Horizonte "C": material areno-argiloso, de cor mosqueada de castanho e bege, pulverulento. Constituído por argilo-minerais, quartzo, feldspato parcialmente alterado, biotita	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L400-250N
Intervalo (m)	Descrição	
0,00 - 0,15	Horizonte “O”, a vegetação é constituída por samambaias	
0,15 - 2,15	Horizonte “B”: solo castanho claro, areno-argiloso, compacidade moderada (pegajoso ao trado).	
2,15 - 7,40	Horizonte “C”: Material bege a vermelho constituído por quartzo, biotita parcialmente alterada, argilominerais e feldspato caulinizado. A partir dos 6m o material apresenta-se pintalgado de bege, com melhor preservação dos minerais e estrutura da rocha.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L400-100N
Intervalo (m)	Descrição	
0,0-0,30	horizonte A; Solo marrom escuro, com raízes, friável, plástico, siltico-argiloso.	
0,30-3.7	horizonte B; solo castanho a vermelho, areno-argiloso, plástico, compacto, pegajoso, com quartzo.	
3,7-6,06	Material castanho-bege, areno-argiloso, muito compacto, pegajoso, plástico, com estruturas de rocha preservadas. Em 4.5 m material mais compacto, vermelho. Em 6,06 m regolito impenetrável ao trado.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L400-370N
Intervalo (m)	Descrição	
0,00 - 0,05	Horizonte “O”, a vegetação é constituída por samambaias	
0,05 - 0,37	Horizonte “A”: solo marrom escuro, areno-argiloso	
0,37 - 2,60	Horizonte “B”: solo castanho- claro, areno-argiloso, compacidade moderada pegajoso ao trado.	
2,60 - 8,60	Horizonte “C”: material de cor bege vermelho, argilo-arenoso.	

FICHA DE SONDAAGEM A TRADO		ST nº L400-500N
Intervalo (m)	Descrição	
0,00 - 0,10	Horizonte “A”: solo cinza escuro com raízes, areno-siltoso, constituído por grãos de quartzo e argilo-minerais	
0,10 - 2,25	Material de cor marrom claro, argilo-arenoso, compacidade incipiente e estrutura fraca/pequena	
2,64 - 3,80	Material de cor bege claro, arenoso, constituída por quartzo e feldspato caulinizado	

ANEXO 3 - MAPAS DE ISOCARGABILIDADES

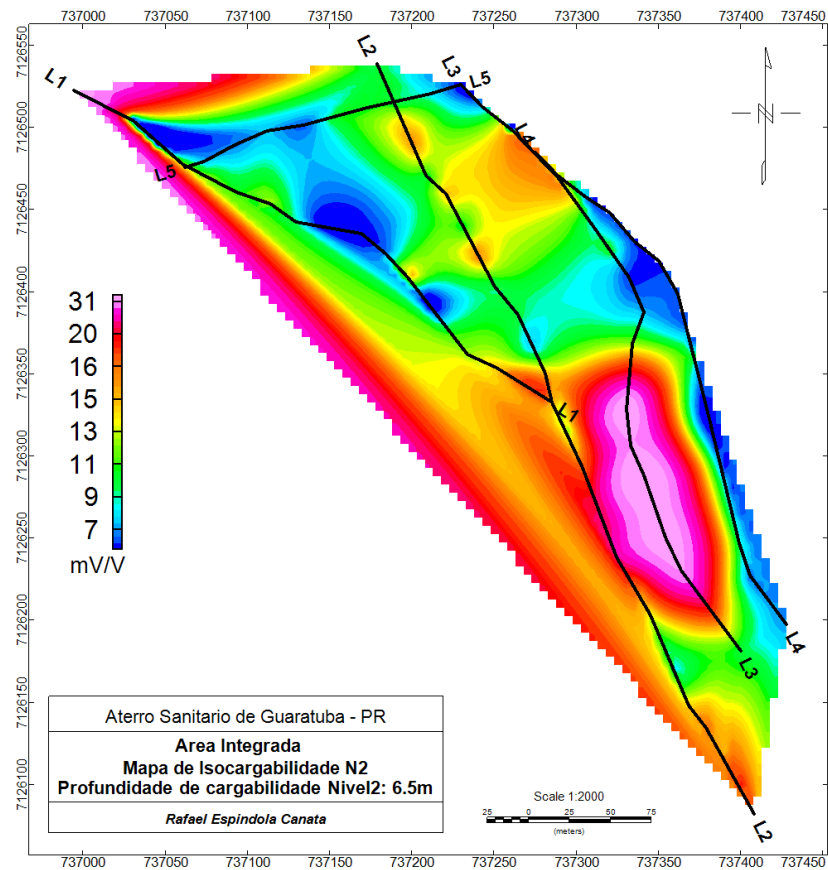


FIGURA 80: Mapa de isocargabilidade nível 2 com profundidade de 6,5m

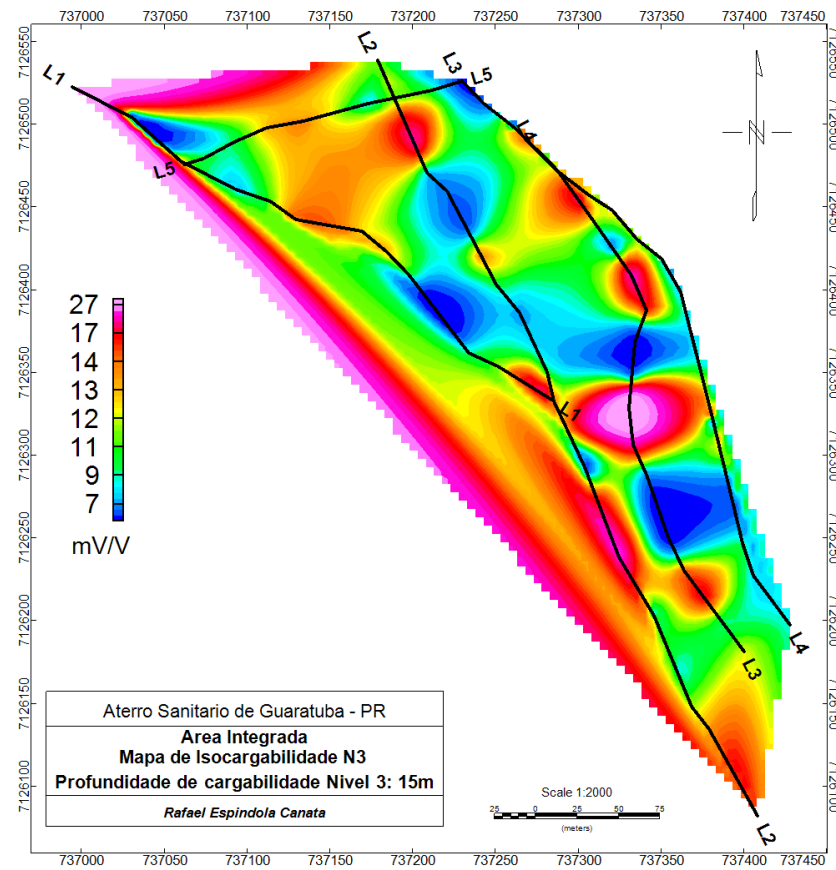


FIGURA 81: Mapa de isocargabilidade nível 3 com profundidade de 15m

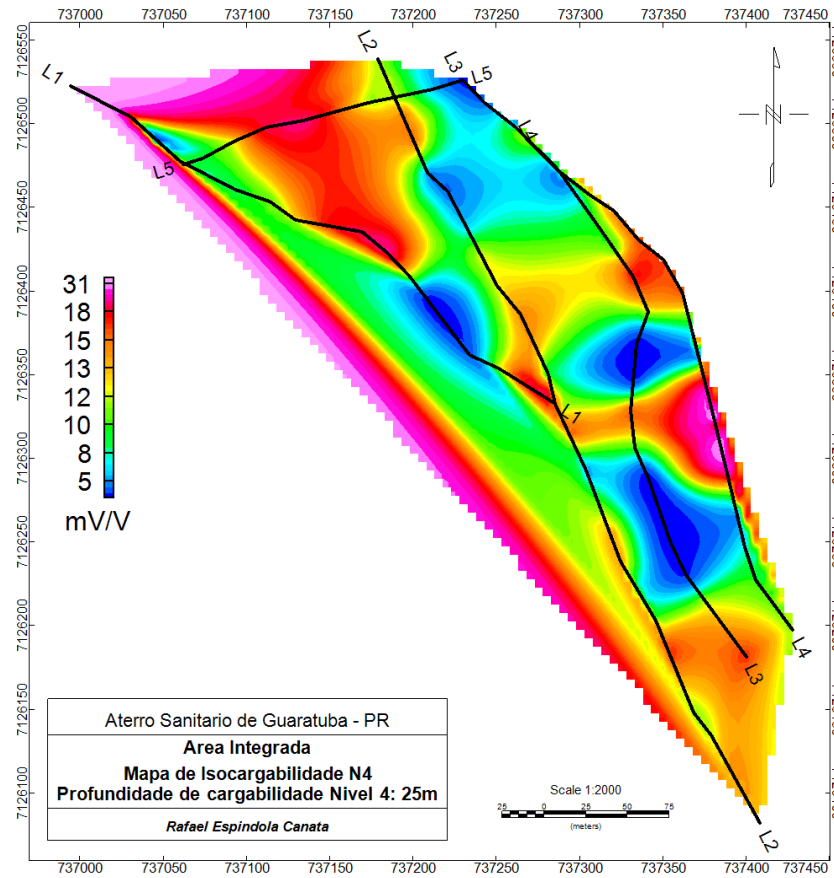


FIGURA 82: Mapa de isocargabilidade nível 4 com profundidade de 25m

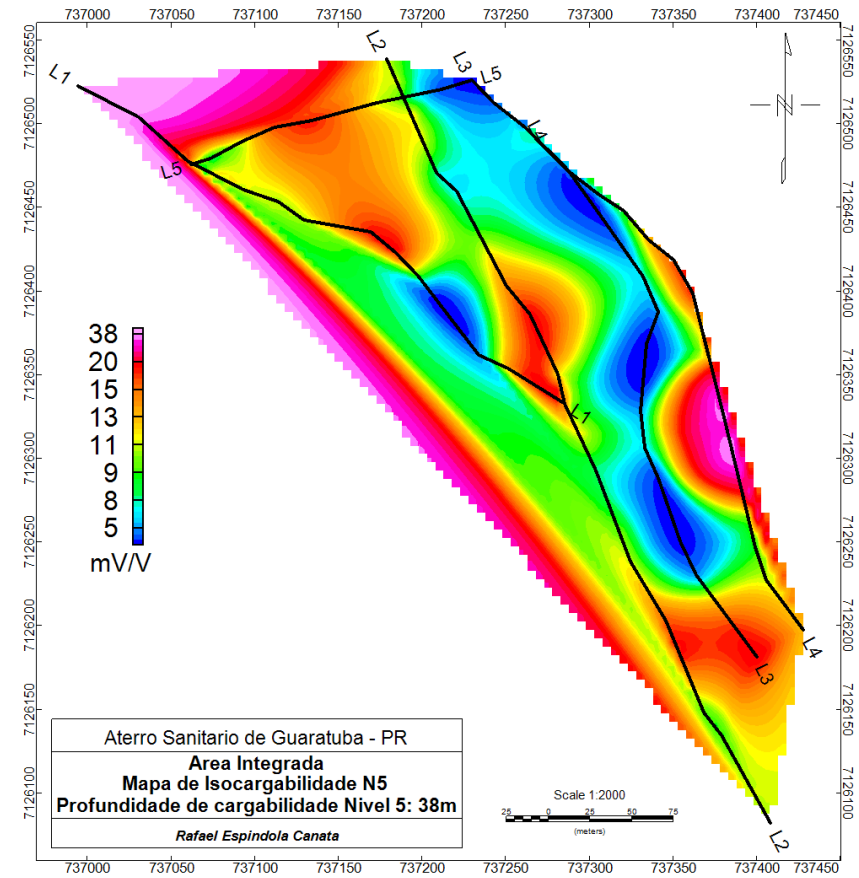


FIGURA 83: Mapa de isocargabilidade nível 4 com profundidade de 34m